

BEÉGETHETIK-E NAPSÜTÉSSEN A NÖVÉNYEK LEVELEIT A RÁJUK TAPADT VÍZCSEPPEK?

**Egy tévhitekkel terhes környezetoptikai probléma
tisztázása**

Egri Ádám

Környezetoptika Laboratórium,
Biológiai Fizika Tanszék,
Fizikai Intézet, Természettudományi Kar,
Eötvös Loránd Tudományegyetem,

TDK dolgozat



Témavezetők:

Dr. habil. Horváth Gábor

egyetemi docens, az MTA doktora
Környezetoptika Laboratórium,
Biológiai Fizika Tanszék,
Fizikai Intézet, Természettudományi Kar,
Eötvös Loránd Tudományegyetem

Dr. Kriska György

egyetemi adjunktus
Biológiai Szakmódszertani Csoport,
Biológiai Intézet, Természettudományi Kar,
Eötvös Loránd Tudományegyetem

Budapest

2009.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Összefoglalás.....	3
2. Bevezetés:.....	4
3. Kísérleti és számítógépes módszerek.....	8
4. Eredmények.....	15
5. Elemzés.....	30
6. Köszönetnyilvánítás.....	35
9. Irodalom.....	36

1. Összefoglalás

Széles körben elterjedt vélekedés a kertészetben és növényvédelemben, hogy a növényeket délben, tűző napon nem szabad locsolni, mert a növényekre tapadt vízcseppek megégethetik a leveleket azáltal, hogy a levél felszínére fókuszálják a napfényt. Hasonló vélemény fordul elő a bőrgyógyászatban és kozmetikában is, miszerint az emberi bőrön megtapadt vízcseppek veszélyt jelentenek napozás közben, mert a bőrre fókuszálják a napfényt. Az erdészeti szakirodalomban is föl-fölbukkan az a hit, hogy a vízcseppek által az elszáradt növényzetre fókuszált napfény erdőtűzet okozhat. A növények felületén ülő vízcseppek fényfókuszálását részleteiben eddig még nem vizsgálták.

Hogy pótoljam e hiányt, a napsütötte növényi levelekhez tapadt vízcseppek által fókuszált napfény miatti esetleges levélégés mélyebb megértésének céljából négy kísérletet végeztem. Először demonstráltam, hogy vízszintes juharleveleken (*Acer platanoides*) elhelyezkedő, 1.5 törésmutatójú, 2 és 10 mm közti átmérőjű üveggolyók napsütésben súlyos égési sérüléseket (barnulást) okoznak a levélszövetben. Utána megmutattam, hogy páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*) és korai juhar (*Acer platanoides*) vízszintes sima, többé-kevésbé víztaszító levelein ülő napsütötte vízcseppek nem képesek beégetni a levélszövetet. Ezáltal megcáfoltam azt a régi közhiedelmet, miszerint eső vagy öntözés után mindig napégést szenvednek a növények a rájuk tapadt vízcseppek napfényfókuszáló hatása miatt. Ugyanakkor azt is megmutattam, hogy napsütésben a rucaöröm (*Salvinia natans*) erősen víztaszító viaszszőrei által tartott vízcseppek megégethetik a levélszövetet. Vizsgálataim alapján azt a végkövetkeztetést vontam le, hogy azon általános vélekedés, miszerint a növényekhez tapadt vízcseppek apró nagyítólencséként összegyűjtve a napfényt mindig megégetik a leveleket, nem más, mint egy közkeletű tévhit.

TDK dolgozatom eredményei a következő publikációhoz járultak hozzá:

[1] Ádám Egri, Ákos Horváth, György Kriska, Gábor Horváth (2009) Optics of water drops on leaves with emphasis on the possible sunburn: Conditions under which sunlit water droplets on plants may cause leaf burn. *New Phytologist* (impact factor: 5.259) (in press)

2. Bevezetés

Egy a kertészetben és növényvédelemben széles körben elterjedt vélekedés szerint a növényeket délben, tűző napon nem szabad locsolni. Ennek az egyik leggyakoribb magyarázata, hogy a levelekre tapadt vízcseppek nagyítólencséként a napfényt összegyűjtve égési sérüléseket okozhatnak a leveleken. A Világhálón böngészve számos kertészettel és növényvédelemmel kapcsolatos olyan honlapra akadtam, melyek azzal a kérdéssel is foglalkoztak, hogy képesek-e a vízcseppek fénypókusálás által sérüléseket okozni a növényeken. Tapasztalatom szerint ezen oldalak mintegy 77%-a (1. táblázat) válaszolt pozitívan a következő kérdésre: Kiegethetik-e a napsütötte vízcseppek a leveleket? Itt most csak két szélsőséges véleményt idézek:

- *A levélégés fő okai a vízpermet, a trágyalé vagy különféle vegyszerek lehetnek, amelyek a lombozatra kerülnek meleg nyári időben. Ekkor az történik, hogy a levélen ülő vízcsepp úgy viselkedik, mint egy nagyítólencse – a napfényt a levélre fókuszálja, így az túlmelegszik, majd beég. Hasonlóan ahhoz, mint mikor egy nagyítólencsével megégetünk egy darab papírt.*
(<http://www.searle.com.au/leafburn.htm>)
- *Itt a meleg nyári idő, mikor az embereknek azt szokták ajánlani, hogy ne locsoljanak napsütésben. A legkézenfekvőbb ok, hogy ekkor túl nagy a párolgási vízveszteség. Olyan vélemények is hallhatók, hogy a napsütésben való öntözés megégeti a növényeket, mert a vízcseppek összegyűjtik a napfényt. [...] Valóban megégetnek a növények a vízcseppek miatt? Nem hiszem, hogy egy vízcsepp olyan hatékony nagyítólencse volna. Egy vízcsepp fókuszpontja határozottan a levél alatt van. Ahogy a levélen ülő csepp mérete csökken, a fókuszpontja fölfelé mozog, viszont kevesebb fényt tud összegyűjteni. Tehát én nem fogadom el a nagyítólencse elméletet.*
(<http://www.cahe.nmsu.edu/ces/yard/1999/062899.html>)

honlap címe	cikk címe	válasz	
		igen	nem
http://www.avsa.org/BasicCare.htm#Watering	Basic care for African violets: water	+	–
http://forums.gardenweb.com/forums/load/pests/msg0712193332527.html?6	What's happening to my Canna leaves?	+	–
http://www.bbg.org/gar2/topics/plants/handbooks/growingorchids/growingrequirements_lightandwater.html	Growing requirements	+	–
http://www.searle.com.au/leafburn.htm	Leaf burn	+	–
http://www.komal.hu/forum/forum.cgi?a=to&tid=122&st=25&dr=0&sp=151#14742	Everyday physics	+	–
http://viragcenter.hu/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=103	Sunburnt geranium	+	–
http://www.torzsasztal.hu/Article/showArticle?t=9107193&go=79397338&p=1	Palms in the garden and room	+	–
http://palmailgetmagyarorszagnak.com/modules/smartsection/item.php?itemid=247	Palm diseases	+	–
http://www.bakker-holland.hu/Garden/Article.aspx?article=735	Garden calendar – July	+	–
http://www.szepzold.hu/index.php?d=comment_new&r=1800&p=1795	Parasite, or other?	+	–
http://en.allexperts.com/q/House-Plants-721/Jade-Plant-trouble-leaves.htm	House plants	+	–
http://www.preen.com/articles/water-conservation-tips	Water conservation tips	+	–
http://davesgarden.com/community/forums/t/928852/	Beginner gardening questions: Too much water?	+	–
http://mb-soft.com/public2/irrigati.html	Modern irrigation techniques	+	–
http://www.oldfashionedliving.com/spray.html	Simple soap sprays work!	+	–
http://www.orchidgeeks.com/forum/orchid-care-cultivation/10288-white-spots-on-my-orchids.html	White spots on my orchids	+	–
http://www.cottoncncr.org.au/files/fe277d2c-d56c-40ba-bf07-9b7b00ff33c/CQ0812.pdf	Cotton tales	+	–
http://forums.gardenweb.com/forums/load/okgard/msg0513520911399.html	Leaves on tomato plants turning whitish color	+	–
http://www.hhrf.org/ujszo/2001/63/melleklet.htm	Our garden and yard	+	–
http://www.gardening.ro/index.php?option=com_content&task=view&id=93	A nyakon öntés nem segít	+	–
http://www.baumax.hu/Content.Node/garten/bewasserungdergarten.php	Watering of the garden	+	–
http://www.fiskars.com/content/Garden_en_US/garden/freshfromthegarden/flower+gardening/watering/watering+basics	Watering basics	+	–
http://www.worldagroforestrycentre.org/NurseryManuals/Community/WaterIsLife.pdf	Water is life	+	–
http://www.arhomeandgarden.org/landscaping/Irrigation/default.htm	Irrigation	+	–
http://www.garden4less.co.uk/watering-the-lawn-at-night.asp	When is the best time to water the garden?	+	–
http://www.greenandeasy.co.uk/Information/Saving-Water-in-the-Garden.aspx	Saving water in the garden	+	–
http://www.dgsgardening.btinternet.co.uk/water.htm	When and how to water	+	–
http://www.walterreeves.com/landscaping/article.phtml?cat=19&id=518	Water drops do not burn foliage	–	+
http://www.cahe.nmsu.edu/ces/yard/1999/062899.html	Does watering burn plants?	–	+
http://www.bonsai4me.com/Basics/Basics%20Bonsai%20Myths%20Misting.htm	Watering in direct sunlight and misting your bonsai	–	+
http://ag.arizona.edu/gardening/news/articles/16.10.html	Spray plant leaves to keep them cool	–	+
http://www.coopext.colostate.edu/4dmg/Garden/beware.htm	Beware of gardening myths	–	+
http://janets-garden.blogspot.com/2006/09/gardening-myth-dangerous-raindrops.html	Gardening myth: dangerous raindrops	–	+
http://www.extension.org/faq/37535	Is it true I should not water my plants/lawn during the day as the water will burn my plants?	–	+
http://www.hort.wisc.edu/cran/pubs_archive/newsletters/1997/7597nslt.pdf	Leaf spots	–	+

1. táblázat. Kertészeti és növényvédelmi honlapok listája, melyek a napsütötte növényi leveleken ülő vízcseppek által történő beégés kérdésével is foglalkoznak. Kérdés: A napsütötte leveleken ülő vízcseppek beégethetik-e a leveleket? Az igenlő válaszok aránya $27 / 35 = 77.1\%$.

E biooptikai probléma az (alap-, közép- és felsőfokú) oktatásban is gyakran előfordul. Példaként idézem a 2006. május 15-ki gimnáziumi fizika érettségi feladatsor egyik feladatát, amit a Oktatási Minisztérium adott ki:

”Nyáron, déli napsütésben nem ajánlatos a kertben locsolni, mert „megégnék” a növények levelei. Az alábbi magyarázatok közül csak egy fogadható el, melyik?”

A) A gyorsan párolgó víz hirtelen lehűti a növényt. A fagyás tünetei megegyeznek az égésével.

B) A vízcseppek gyűjtőlencseként viselkednek, és a levelekre fókuszálják a napfényt.

C) Az elpárolgó víz forró gőze okoz „égési tüneteket”.

A válaszok közül a B-t fogadták el helyesnek. Mindebből jól látszik, hogy sok laikus és szakember is úgy gondolja, öntözés vagy eső után a vízcseppek képesek megégetni a leveleket napsütésben. Valójában ez egy régi környezetoptikai probléma, aminek megoldása egyáltalán nem egyszerű.

Egy másik hasonló kérdés, hogy a vízcseppekkel borított emberi bőr szenvedhet-e sérüléseket napozás közben. Az e kérdéssel is foglalkozó, általunk meglátogatott bőrgyógyászati és kozmetikai honlapok 89%-a (2. táblázat) pozitívan válaszolt arra a kérdésre, hogy: Képesek-e a napsütötte vízcseppek megégetni az emberi bőrt? De az erdőtüzekkel foglalkozó szakirodalmában is föl-fölbukkan az a vélekedés, hogy e tüzeket vízcseppek kelthetik azáltal, hogy az elszáradt növényzeten maradt esőcseppek összegyűjtik a napfényt (3. táblázat).

honlap címe	cikk címe	válasz	
		igen	nem
http://www.csaladinet.hu/index.php?module=profs&action=faq&id=2833&offset=35	White spot disease	+	–
http://www.apolka-szalon.com/temak/napozas.htm	Safe sun-bathing	+	–
http://www.medlist.com/HIPPOCRATES/II/3/145.htm	Characteristics of skin treatment in summer	+	–
http://www.szepsegbroker.hu/articles/47	Summer = UV radiation – sun cream, protection against sunlight	+	–
http://www.herbaria.hu/data/magazin/herbaria_5.pdf	Summer, sunshine, shore, holiday	+	–
http://www.himaya.com/solar/spf_examples.html	Sun exposure on water	+	–
http://www.bautforum.com/archive/index.php/t-14035.html	Looking for chart of UV absorption in water	+	–
http://www.dermaweb.com/english/dermato/avene/protecteurs_solaires.html	The 10 commandments for safe suntanning	+	–
http://archive.haon.hu/csalad/csalad-egeszseg-170129.shtm	The dermatologist answers	–	+

2. táblázat. Bőrgyógyászati és kozmetikai honlapok listája, melyek az emberi bőrön megtapadt vízcseppek napozás közbeni veszélyével is foglalkoznak. A kérdés: A napsütötte bőrön ülő vízcseppek megégethetik-e a bőrt? Az igenlő válaszok aránya $8 / 9 = 88.9\%$.

honlap címe	cikk címe	válasz	
		igen	nem
http://fotocz.hu/fotot_megmutat?Foto_ID=30936	Forest fire and water drops	+	–
http://mek.oszk.hu/01200/01214/01214.pdf	Radó (2001) Role of vegetation in protection of the environment	+	–
http://wiki.answers.com/Q/Whether_presence_of_water_cause_forest_fire	Whether presence of water cause forest fire?	+	–

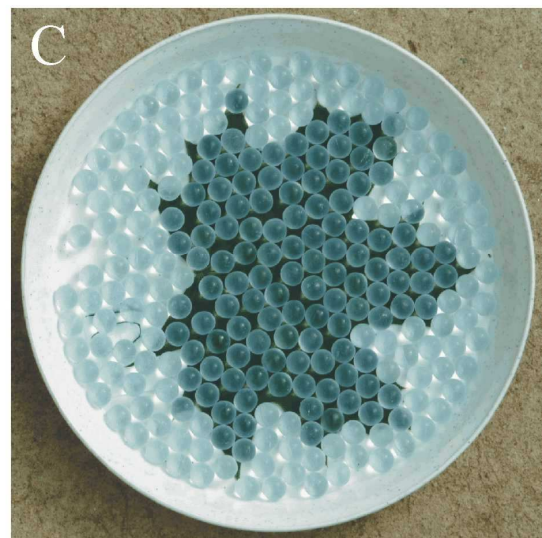
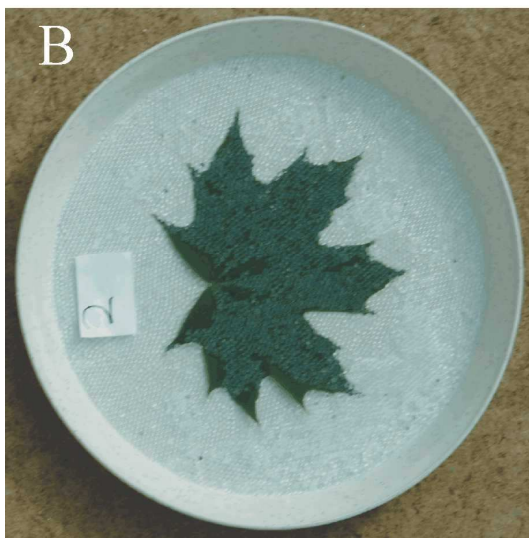
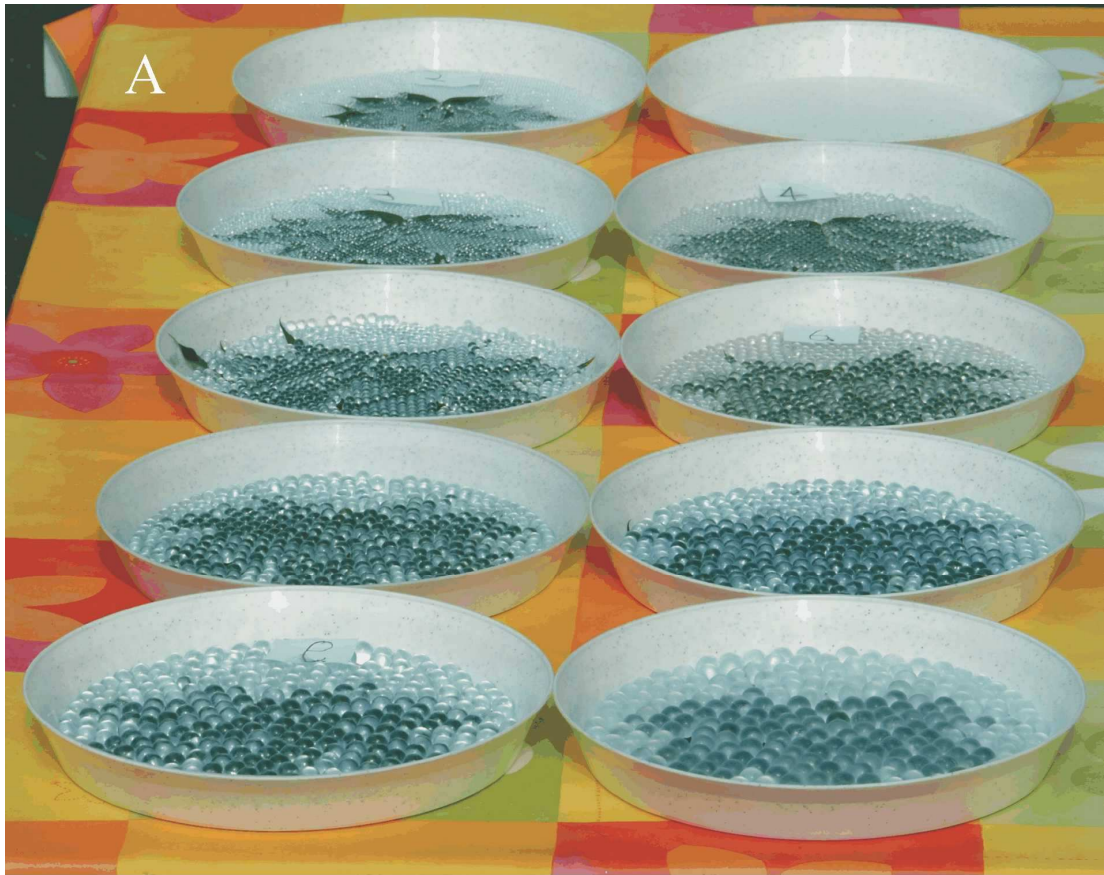
3. táblázat. Néhány honlap listája, amely említést tesz arról is, hogy okozhat-e erdőtűzet a vízcseppek által fókuszált napfény. A kérdés: Kialakulhat-e erdőtűz napsütötte vízcseppek miatt? Az igenlő válaszok aránya $3 / 3 = 100\%$.

A szóban forgóhoz leginkább hasonló abiotikus optikai probléma a fény törése hulló esőcseppeken, ami a jól ismert szivárványt eredményezi. Bár a szivárvány irodalma igen nagy (például: DESCARTES (1637), AIRY (1838), KHARE - NUSSENZWEIG (1974), NUSSENZWEIG (1977), KÖNNEN - DE BOER (1979), WANG - VAN DE HULST (1991), LEE (1998), CSERTI (2005)), a kapcsolódó elméletek, és kísérletek kizárólag csak gömb alakú és gömbölyded vízcseppekre vonatkoznak, mivel a hulló esőcseppek ilyenek. Élő szervezetekben hasonló problémára akadunk a halak szemében: A halak szemlencséje gömb alakú, helyfüggő törésmutatóval (LAND - NILSSON (2002)). Különböző halak szemlencséje optikájának megismerése céljából elméleti, kísérleti és számítógépes vizsgálatokat végeztek. Ezek egyikében egy optikailag homogén, gömb alakú szemlencse fénygyűjtőképességét modellezték (JAGGER (1992)), míg mások sugárfüggő törésmutatóval tették ugyanezt (KRÖGER et al. (1999)).

Tudomásom szerint, levelekhez tapadt vízcseppek fénypókusálását behatóan sem kísérleti, sem pedig elméleti úton nem tanulmányozták eddig. Hogy ezt az űrt betöltsen, és eldöntsem, hogy az *1. táblázat* melyik véleménye helyes, számítógépes modellezést és kísérleteket végeztem a napsütötte levelekhez tapadt vízcseppek fénygyűjtésének tanulmányozása céljából. Négy kísérletet végeztem üveggolyókkal és vízcseppekkel borított, napsütésnek kitett, sima, illetve szőrös (különböző nedvesítőképességű) vízszintes levelekkel. TDK dolgozatomban részletesen leírom a kísérleteket, bemutatom az eredményeket, és levonom belőlük a következtetéseket.

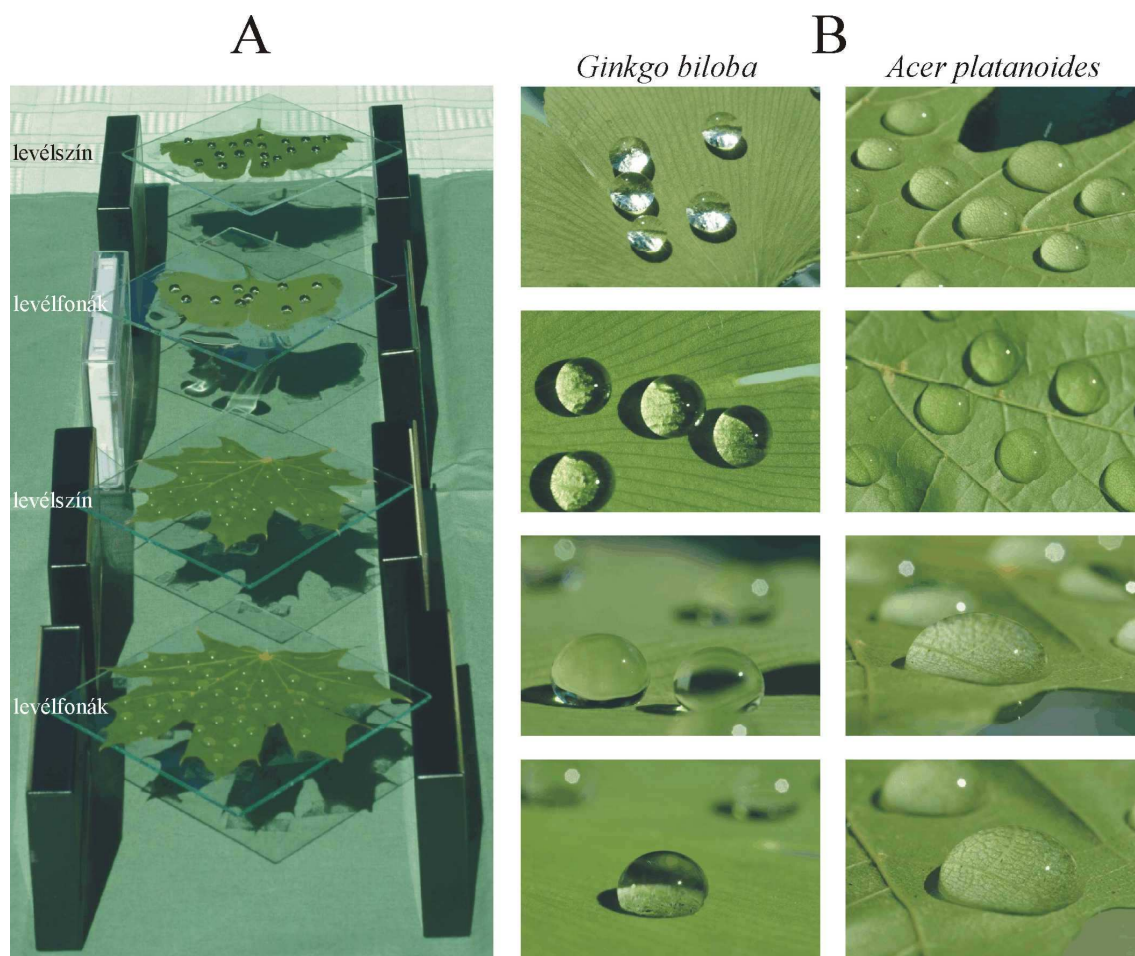
3. Kísérleti és számítógépes módszerek

Az első kísérletet három napig végeztem felhőtlen, meleg, napos időben Gödön (47° 43' N, 19° 09' E) egy kertben. Tíz műanyag tálcát tettem egy asztalra (*1A ábra*), mindegyikbe egy-egy frissen levágott, sima felszínű juharlevelet (*Acer platanoides*) helyeztem. Az 1., 2., 3., ..., 9. tálcákban a leveleket teljesen lefedtem $n_{\text{üveg}} = 1.50$ törésmutatójú, 2, 3, 4, ..., 10 mm átmérőjű üveggolyókkal (*1. ábra*). A 10. tálcán a levél szabadon maradt, nem kerültek rá üveggolyók; ez volt a kontroll. Az asztalt a tálcákbeli, üveggolyókkal fedett levelekkel együtt közvetlen napsütésnek tettem ki három eltérő időtartamig: hosszú (2007. július 8., 8:00 – 17:00 óra között = helyi nyári idő = UTC + 2), közepes (2007. július 14., 10:30 – 13:30) és rövid (2007. július 17., 16:00 – 17:00) ideig. A besugárzási idő alatt egyszer sem esett árnyék a levelekre. A kísérlet után a leveleket a laboratóriumban egy Canon Arcus 1200 típusú szkennelrel vittem számítógépre az esetleges napégés elemzése céljából (*5. ábra*).



1. ábra. (A) Az 1. kísérletben tíz kör alakú, szürke, műanyag tálca mindegyike azonos átmérőjű, de tálcaként eltérő méretű üveggolyókkal borított juharlevelet (*Acer platanoides*) tartalmazott. A 10. tálcában a juharlevél (a képen nem látható) szabadon volt, golyók nélkül. (B, C) Két tálca, melyekben 2 mm (B), illetve 10 mm (C) átmérőjű üveggolyók fedték le a juharlevelet.

A második kísérletet 2007. július 26-án végeztem ugyanazon kertben, ahol az első. Meleg, napos, szélmentes idő volt, tiszta égbolttal. Két pár, frissen levágott, sima felszínű (szőrtelen) páfrányfenyőlevelet (*Ginkgo biloba*) és juharlevelet (*Acer platanoides*) négyzet (10 cm × 10 cm) alakú üveglapokra rögzítettem átlátszó, színtelen ragasztószalagokkal, mindkét pár levélből az egyiket a színével, a másikat pedig a fonákjával fölfelé. A leveleket hordozó üveglapokat 10 cm magasságban egy vízszintes asztallap fölé helyeztem távtartók segítségével (2A ábra). Az asztalt egy világoszöld vászon borította. Mind a négy levélre néhány csepp tiszta csapvizet csöppentettem egy szemcseppentővel: a levélfelszínén egy adott helyére négy ugyanakkora vízcseppet csöppentettem, miáltal az összes vízcsepp gyakorlatilag egyforma lett. Az üveglapok vízszintes síkban tartották a leveleket, és lehetővé tették, hogy az asztalt borító zöld vászonról visszavert fény a levelek fonákját érje. Ezzel a természetes helyzetet utánoztam, mikor a földről és a környező növényekről visszaverődő fény alulról világítja meg a leveleket.



2. ábra. (A) A 2. kísérlet elrendezése, melyben két juharlevél (*Acer platanoides*, lent) és két páfrányfenyőlevél (*Ginkgo biloba*, fönt) volt vízszintesen kiterítve egy-egy üveglapon. Mindkét faj levelének fonákját, illetve színét vízcseppek borították. (B) A páfrányfenyőleveleken (bal oszlop) és juharleveleken (jobb oszlop) nyugvó vízcseppek fényképei közlről.

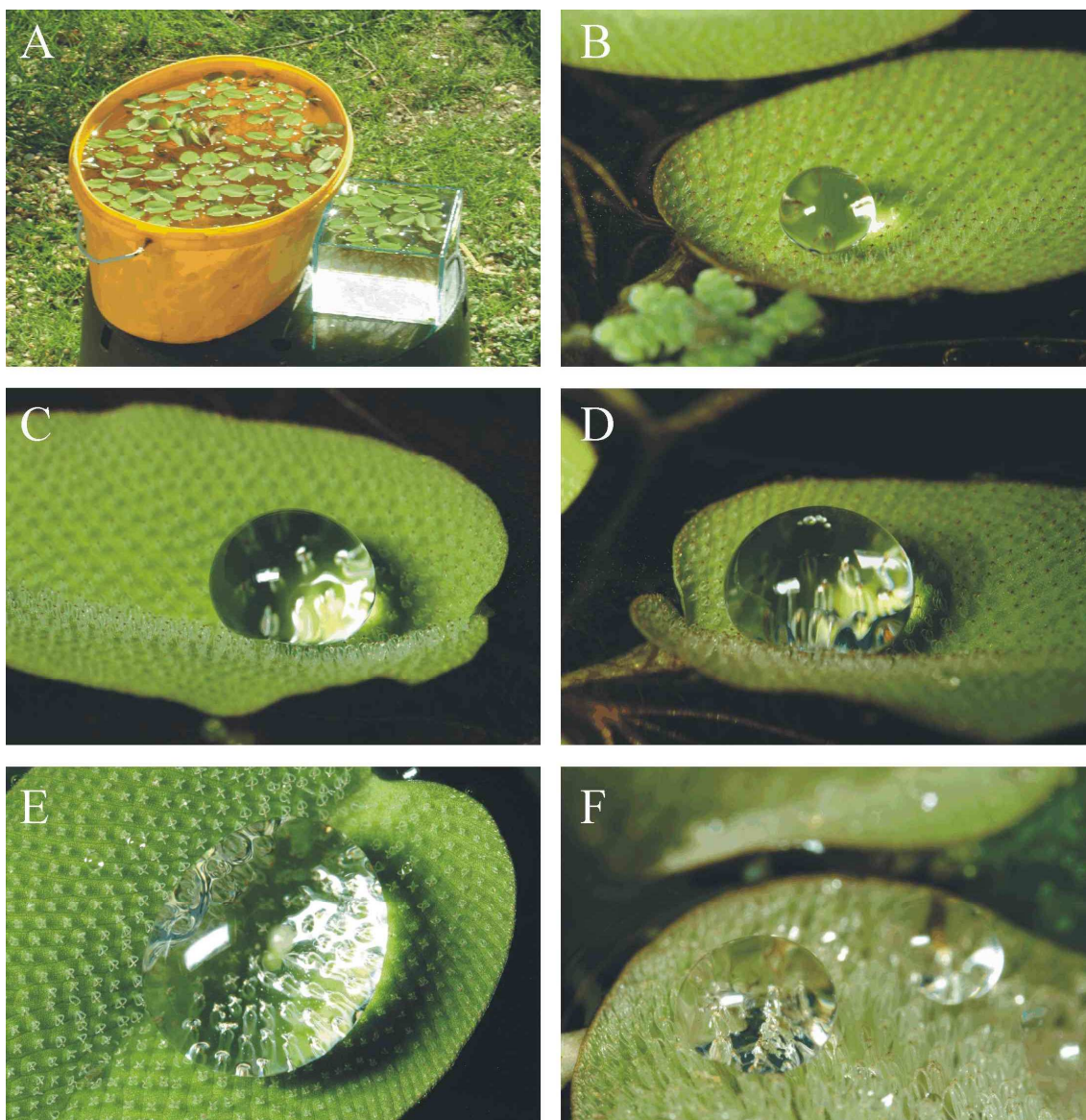
A számos vízcseppet hordozó leveleket közvetlen napfénynek tettem ki. Az első besugárzás reggel, alacsony napmagasságnál, 7:55 órakor (UTC+2) kezdődött (4. táblázat), és addig tartott, amíg a vízcseppek teljesen el nem párologtak a levelek felszínéről. A következő besugárzást új, frissen vágott páfrányfenyő- és juharlevelekkel folytattam, melyek szintén vízcseppeket hordoztak. Összesen három besugárzást végeztem, a harmadik kora délután ért véget (4. táblázat). Ekkortájt a kísérletet mindenképpen be kellett fejezni az egyre növekvő felhőzet miatt: felhős időben nem lehetett garantálni a vízcseppes levelek napfénnel történő folyamatos besugárzását. A kísérlet végeztével a leveleket a laboratóriumban beszkeneltem, hogy dokumentáljam az esetleges napégés nyomait (7. ábra). A besugárzások kezdetének és végének időpontjait, az ekkor mért napmagasságokat és léghőmérsékleteket, továbbá a vízcseppek számát a 4. táblázat foglalja össze. Egy adott besugárzás kezdetének

időpontja mind a négy levélre azonos volt, viszont a végének időpontja különbözött, mert a vízcseppek párolgási sebessége függött a levélfelszín minőségétől, amennyiben ez határozta meg a levél és a vízcsepp közti nedvesítési szöget, így a vízcsepp alakját is, valamint a levél fényvisszaverő-képességét (2B ábra).

besugárzás	levél (besugárzott oldal)	kezdet		vég		$T (^{\circ}\text{C})$		N
		t	θ	t	θ	kezdet	vég	
1.	<i>Acer</i> (fonák)	7:55	27.5°	9:40	44.9°	24.0	27.0	25
	<i>Acer</i> (szín)	7:55	27.5°	9:35	44.1°	24.0	27.0	21
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	7:55	27.5°	10:30	52.6°	24.0	29.0	8
	<i>Ginkgo</i> (szín)	7:55	27.5°	10:00	48.1°	24.0	28.0	11
2.	<i>Acer</i> (fonák)	10:30	52.6°	11:28	60.1°	29.0	31.0	24
	<i>Acer</i> (szín)	10:30	52.6°	11:20	59.2°	29.0	30.5	29
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	10:30	52.6°	12:00	63.0°	29.0	32.0	18
	<i>Ginkgo</i> (szín)	10:30	52.6°	11:31	60.4°	29.0	31.0	21
3.	<i>Acer</i> (fonák)	12:00	63.0°	13:11	64.4°	32.0	34.0	29
	<i>Acer</i> (szín)	12:00	63.0°	13:01	64.7°	32.0	33.5	31
	<i>Ginkgo</i> (fonák)	12:00	63.0°	13:45	62.3°	32.0	34.5	19
	<i>Ginkgo</i> (szín)	12:00	63.0°	13:17	64.1°	32.0	34.0	21

4. táblázat. A 2. kísérlet három eltérő besugárzási időtartamának kezdete és vége ($t = \text{UTC} + 2$), a Nap horizont fölötti θ szögmagassága, és a léghőmérséklet a besugárzás kezdetén és végén. N a vízcseppek száma a juhar (*Acer platanoides*) és páfrányfenyő (*Ginkgo biloba*) leveleinek színén, illetve fonákján.

A harmadik kísérletet az Eötvös Loránd Tudományegyetem Botanikus Kertjében (47° 28' N, 19° 05' E) végeztem 2007. július 30-án napos, meleg, szélcsendes, felhőtlen időben. Két, vízzel teli edénybe rucaörömöt (*Salvinia natans*) helyeztem (3A ábra), amit közvetlen napfénynek tettem ki 13:00 órától 15:00 óráig (UTC+2). A besugárzás előtt számos kisebb és nagyobb vízcseppet hoztam létre a szőrös rucaörömleveleken (3B-F ábrák) egy szemcseppentővel és kézi permetezővel. A besugárzás alatt a vízfelszínen lebegő rucaöröm- levelek helyzete nem változott. A kétórás besugárzás alatt a kisebb vízcseppek elpárologtak, míg a nagyobbak közül némelyik megmaradt. Azon rucaörömleveleket, melyeken két óra elteltével is volt vízcsepp, a laboratóriumban beszkeneltem, hogy dokumentáljam az esetleges napégés nyomait (9. ábra).

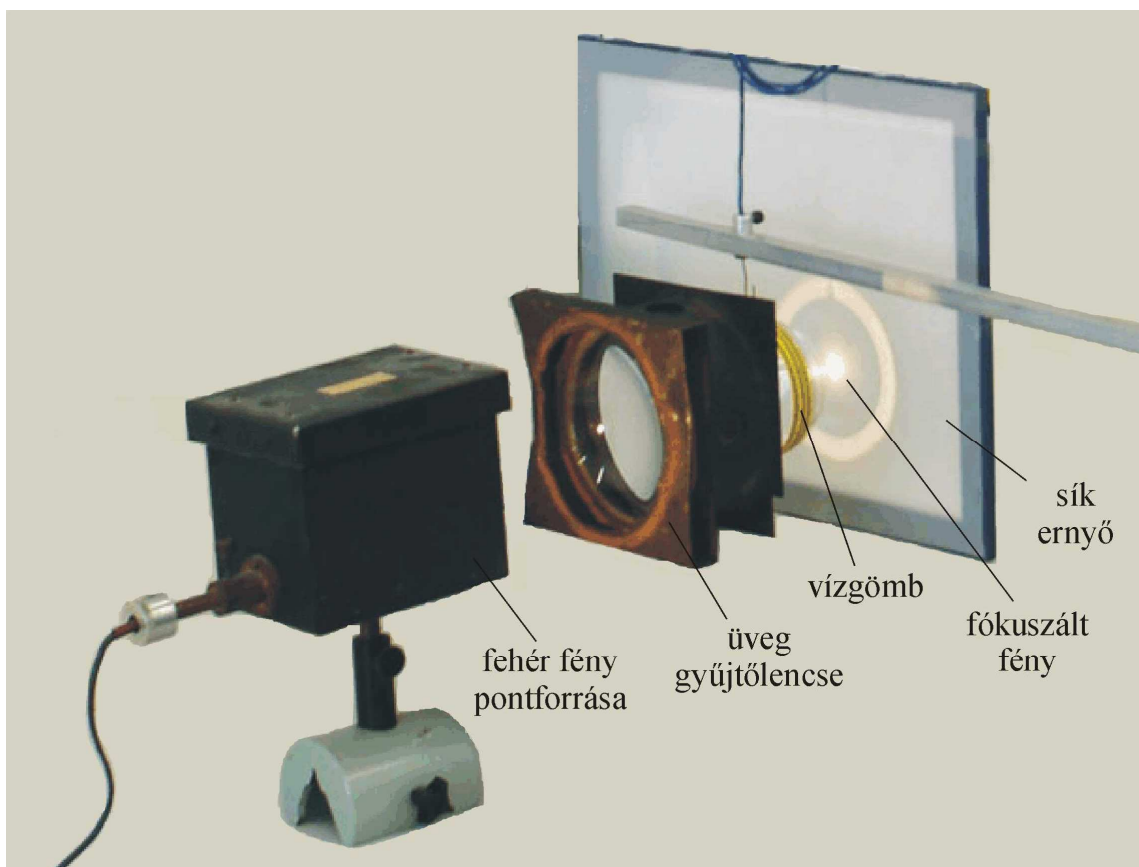


3. ábra. (A) A 3. kísérlet elrendezése, melyben két vízzel teli edénybe rucaörömöt (*Salvinia natans*) helyeztem. (B) A rucaöröm víztaszító, szőrös levelein nyugvó vízcseppek fényképei.

Az ép (zöld) és napégett (barna) levélfelület színeit egy saját fejlesztésű számítógépes programmal hasonlítottam össze (6., 8., 10. ábrák). A kiértékeléshez a levelek beszkenelt képeit használtam. Digitálisan mintákat vettem az ép és napégett levélrészekről. E minták egyenlő számú képpontokból álló körök és/vagy gyűrűk összessége volt. Egy adott levélen kétféle mintavételi területet alkalmaztam, melyek összfelületét azonos számú (600 - 77000) képpont alkotta: egyet a napégett, egyet pedig az ép levélrészeken. Meghatározva a mintavételezett képpontok I_V , I_Z és I_K vörös, zöld és kék intenzitásértékeit ($0 \leq I \leq 255$, ha a színmélység $3 \times 8 = 24$ bit), a következő mennyiségeket számítottam ki: $v = I_V / (I_V + I_Z + I_K)$, $z = I_Z / (I_V + I_Z + I_K)$, $k = I_K / (I_V + I_Z + I_K)$.

Ezek adják meg a vizsgált képpont színének v , z , k koordinátáit ($v + z + k = 1$) az egyenlőszárú színháromszögben (6D ábra).

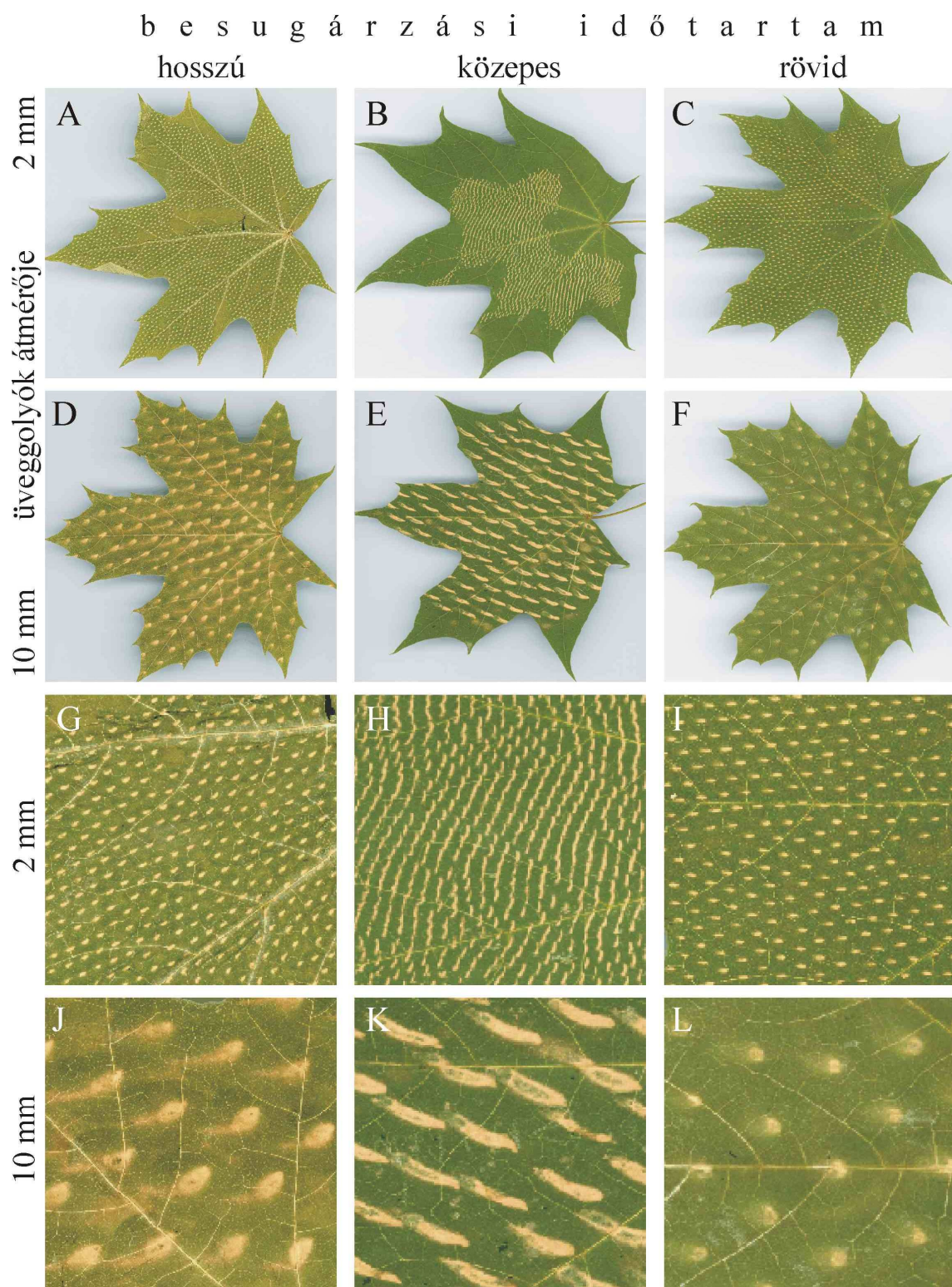
A negyedik kísérletben (4. ábra) egy vékony (1 mm) falú, $R = 10$ cm sugarú, vízzel töltött műanyag gömböt függesztettem föl egy drót segítségével. E vízgömböt fehér párhuzamos fénynyalábbal világítottam meg, amit egy 12 cm átmérőjű gyűjtőlencsével és annak fókuszpontjában elhelyezkedő pontszerű fényforrással állítottam elő. A fényforrás-lencse-vízgömb rendszer optikai tengelyébe helyeztem egy keretben kifeszített pauszpapír ernyőt. Az ernyő és a vízgömb középpontja közti távolság H , az optikai tengely és az ernyő síkjának szöge pedig $\theta = 60^\circ$ és 90° volt. A vízgömb által az ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát besötétített szobában fényképeztem le (13. ábra).



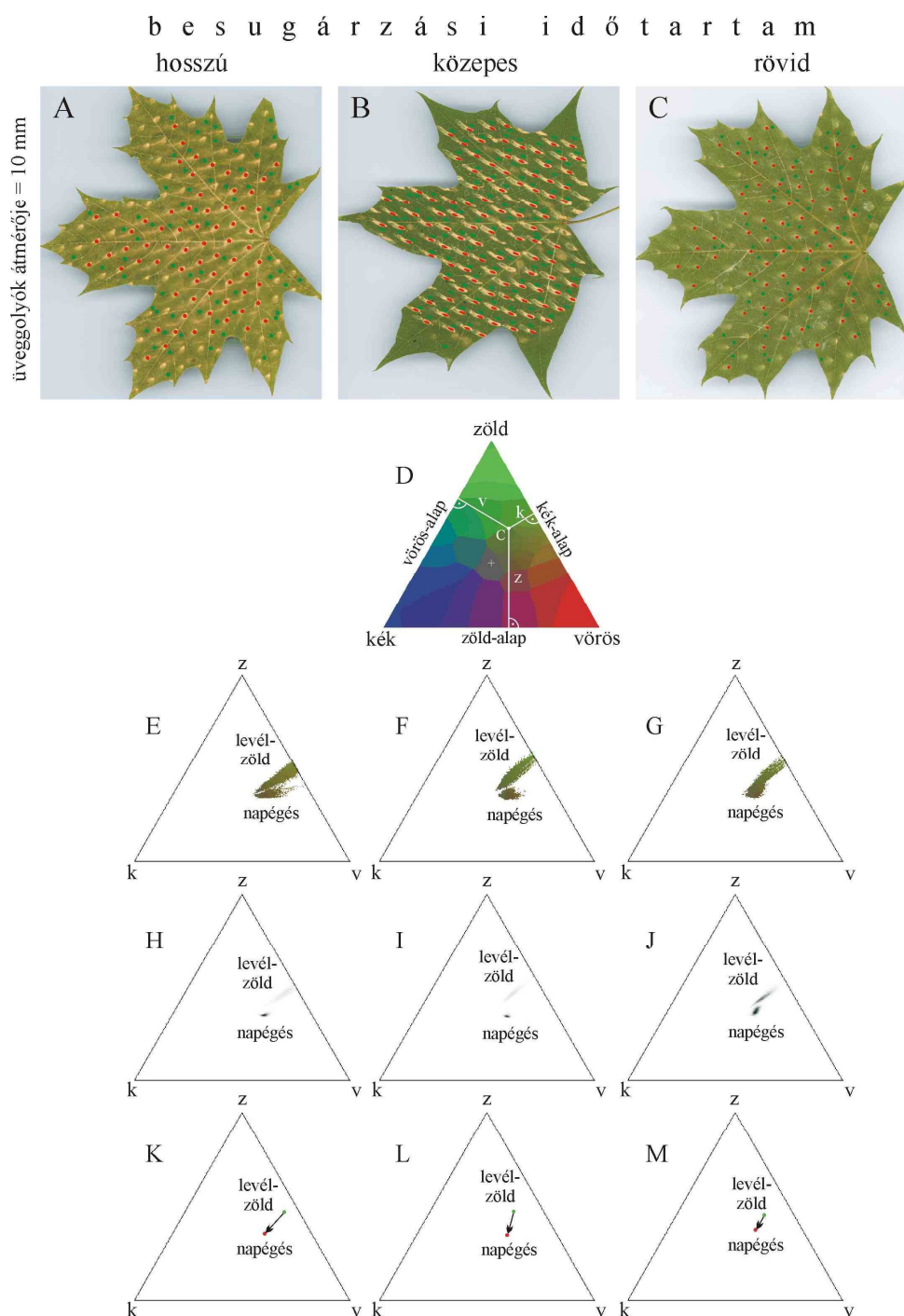
4. ábra. A 4. kísérlet elrendezése, melyben egy vízgömbnek egy sík ernyőre történő fényfókuszálását vizsgáltam.

4. Eredmények

Az 1. kísérlet (1. ábra) mindhárom (rövid, közepes és hosszú) besugárzásakor mindegyik üveggolyóméretnél (2-10 mm) az összes juharlevél (*Acer platanoides*) nagymértékben beégett a golyók által összegyűjtött napfény nagy intenzitása miatt. A napégés következtében a zöld leveleken barna foltok jelentek meg rácsszerű elrendezésben (5. ábra). A 6. ábra kvantitatívan mutatja az ép és napégett levélrészek közti nagy színelkülönbséget. A hosszú besugárzás 9 óráig tartott (reggel 8 órától délután 17 óráig), mialatt a levelek gyenge, közepes és erős napfénynek voltak kitéve alacsony, közepes és magas napállások mellett. A közepes besugárzás 3 óra hosszúságú volt: 10:30-tól 13:30-ig, vagyis akkor, mikor a Nap a legmagasabban járt, s egyben a legintenzívebben sugárzott. A rövid besugárzás mindössze 1 óra volt késő délután, alacsony napállás mellett. Mindebből az a következtetés vonható le, hogy vízszintes leveleken elhelyezkedő száraz üveggolyók ($n_{\text{üveg}} = 1.50$) reggeltől késő délutánig képesek napégési sérüléseket okozni a levélszövetben.

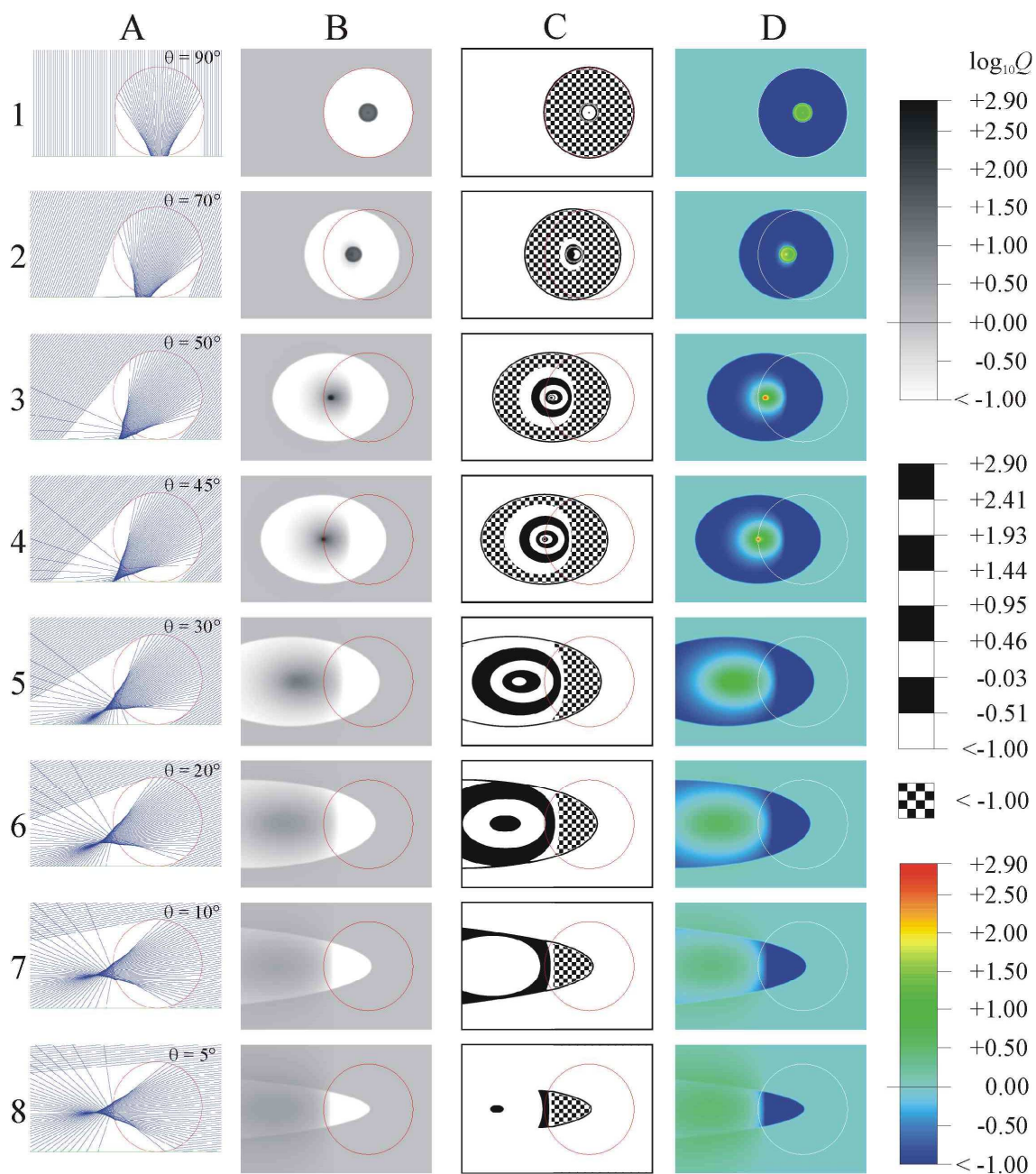


5. ábra. (A-F) Az 1. kísérletben napégést szenvedett juharlevelek (*Acer platanoides*), melyeket 2, illetve 10 mm átmérőjű üveggolyók borítottak a közvetlen napfénnel történt hosszú (bal oszlop), közepes (középső oszlop) és rövid (jobb oszlop) besugárzás alatt. Az üveggolyók által fókuszált napfény nagy intenzitása miatt kialakult barna perzselési foltok jól kivehetők a zöld leveleken. (G-L) Az A-F ábrák 4-szeres nagyításban.

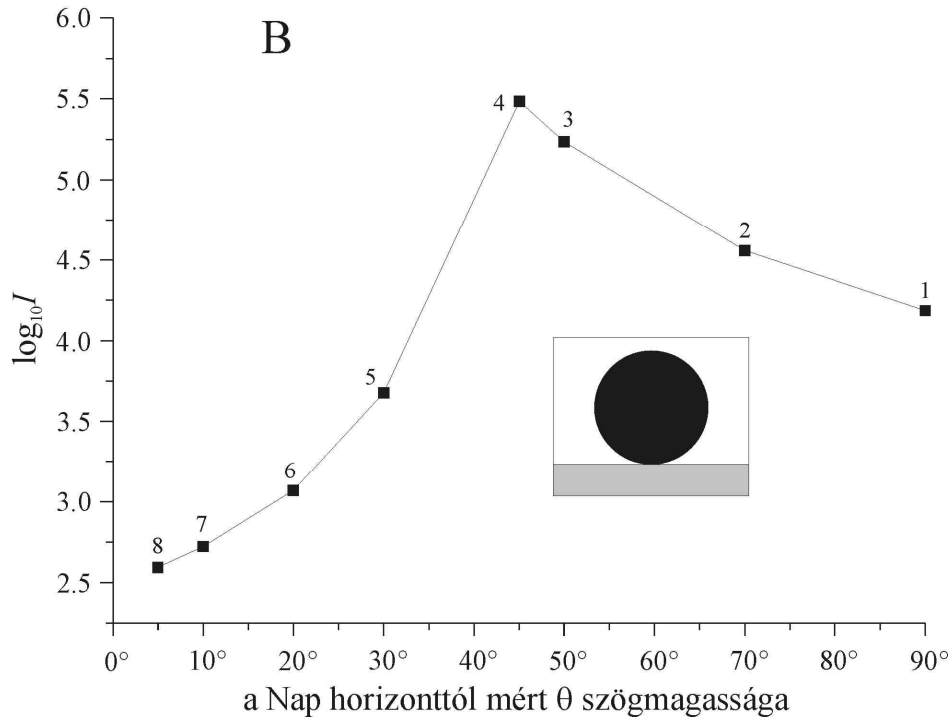
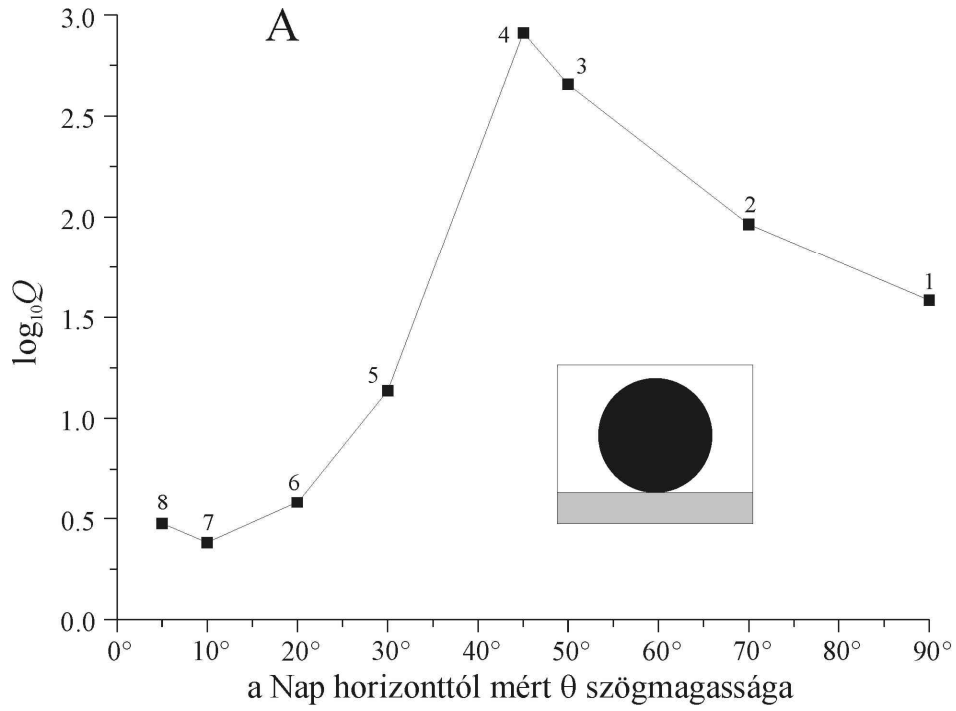


6. ábra. (A-C) A beégett juharlevelek fényképeit (4D,E,F ábrák) az ép (zöld pontok) és napégett (piros pontok) területeken mintavételeztem, hogy kiszámítsam a színháromszögbeli helyüket. Mindkét mintavételezés (zöld és piros pontok) ugyanannyi képpontból állt. (D) Egyenlő oldalú színháromszög, ahol egy adott C szín (v, z, k) koordinátáit merőlegesen mérjük a háromszög megfelelő oldalaitól (a szín-alapoktól). A háromszög színtelen közepét + jel szemlélteti. (E-G) Az A-C ábrákon látható levelek ép (zöld) és napégett (barna) részei színeinek elhelyezkedése a színháromszögben. (H-J) Az ép és napégett levélrészek színeinek gyakorisága. Minél sötétebb egy adott terület, annál több képpontnak ugyanaz a színe az A-C ábrák mintavételezett pontjaiban. (K-M) Az A-C ábrák ép és napégett levélrészei színeinek tömegközéppontja a színháromszögben. A nyilak a napégés miatti színeltolódást (zöldből a vörös felé) szemléltetik.

A 7A ábra egy üveggömb függőleges főtengelymetszetében haladó fénysugarak menetét mutatja a bejövő párhuzamos fénynyaláb vízszintestől mért θ szögének függvényében. A 7B-D ábra az üveggömb Q fénygyűjtőképessége 10-es alapú logaritmusának eloszlását szemlélteti a levél vízszintes síkjában. Ezen intenzitás mintázatokat egy saját fejlesztésű sugárkövető programmal számítottam. A levél síkjában a legnagyobb Q -értékekkel jellemzett "fókusz tartomány" a leginkább veszélyeztetett a napégéssel szemben. A 7B-D ábrán láthatjuk, hogy a fókusz tartomány megközelítőleg egy ellipszis. A 4. és 6. ábrákon látható napégés nyomokat ilyen magas fényintenzitású, ellipszisszerű fókusz tartomány okozta, amint végighaladt a levél egy szakaszán a Nap mozgása következtében. A 8. ábra a vízszintes levélen nyugvó üveggömbre számított $Q(n_{\text{üveg}}=1.5, \theta)$ fénygyűjtőképesség és a gömb által fókuszált, s a levélszövet által elnyelt $I(\theta)$ fényintenzitás 10-es alapú logaritmusát mutatja. Mivel Q és I egyaránt $\theta = 45^\circ$ -nál maximális, ezért a napégés ennél a napállásnál a legvalószínűbb. Egy üveggolyót tartó vízszintes levél $Q(n_{\text{üveg}}=1.5, \theta)/\sin\theta$ -szor nagyobb fényintenzitást nyel el ahhoz az esethez képest, mikor üveggolyó nélkül éri közvetlen napfény ugyanazt a levelet. A 8A ábráról leolvasható, hogy $\log_{10}Q(\theta = 45^\circ) = 2.85$, azaz $Q(\theta = 45^\circ) = 707.9$, tehát $Q(\theta = 45^\circ)/\sin 45^\circ = 1001$. Ebből azt kapjuk, hogy $\theta = 45^\circ$ esetében az üveggolyó fókusz tartományának levéllemezre eső részén a levél 1001-szer nagyobb intenzitású napfényt nyel, mint mikor nincs üveggolyó a levélen. Az 1. kísérletben a fényintenzitás fókusz tartománybeli megezerszereződése okozta tehát a juharlevelek napégését (5. ábra).



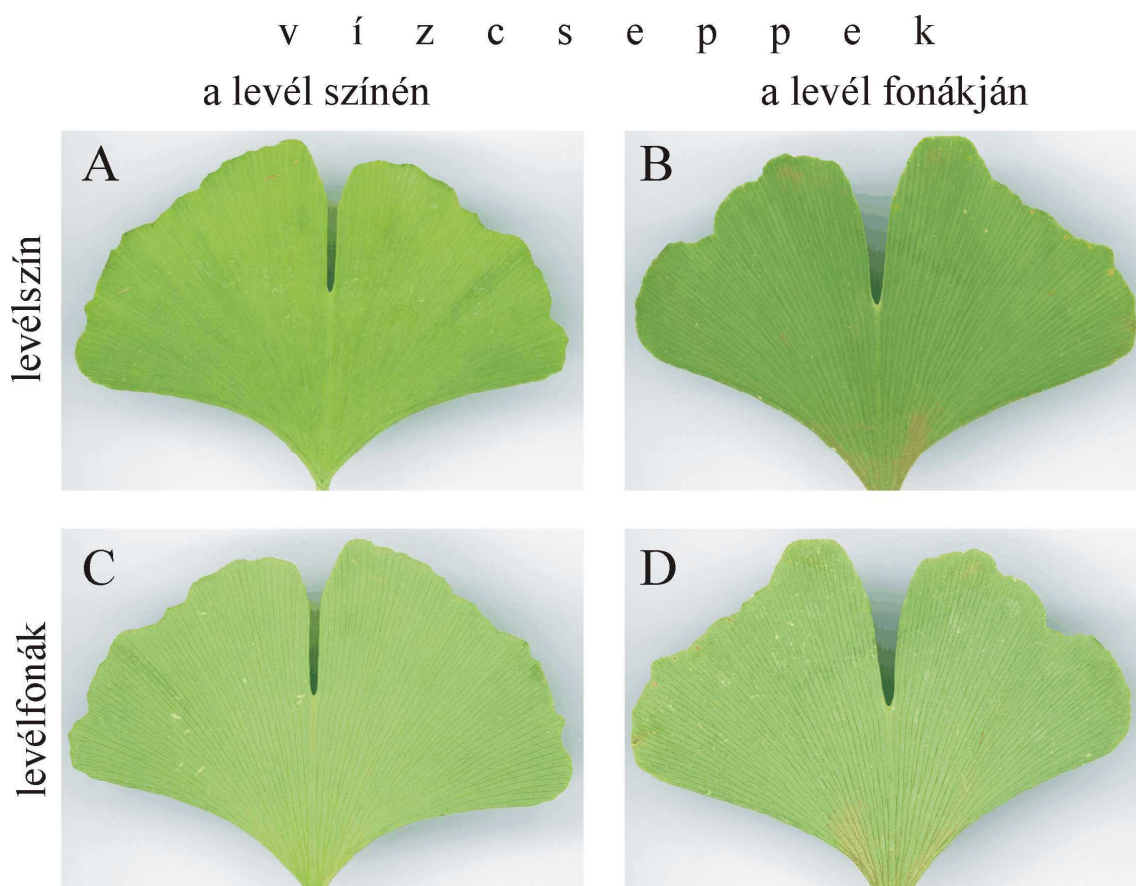
7. ábra. (A) Fénysugarak menete egy $n_{\text{üveg}} = 1.5$ törésmutatójú homogén üveggömb piros kontúrvonalú függőleges főtengelymetszetén keresztül a vízszinteshez képest különböző θ szögekben beeső fénynyalábok esetén. (B-D) Az üveggömb Q fénygyűjtőképessége 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli eloszlása három különböző színkód mellett. Felülről nézve a golyó kontúrvonalát egy (piros, illetve fehér) kör jelzi.



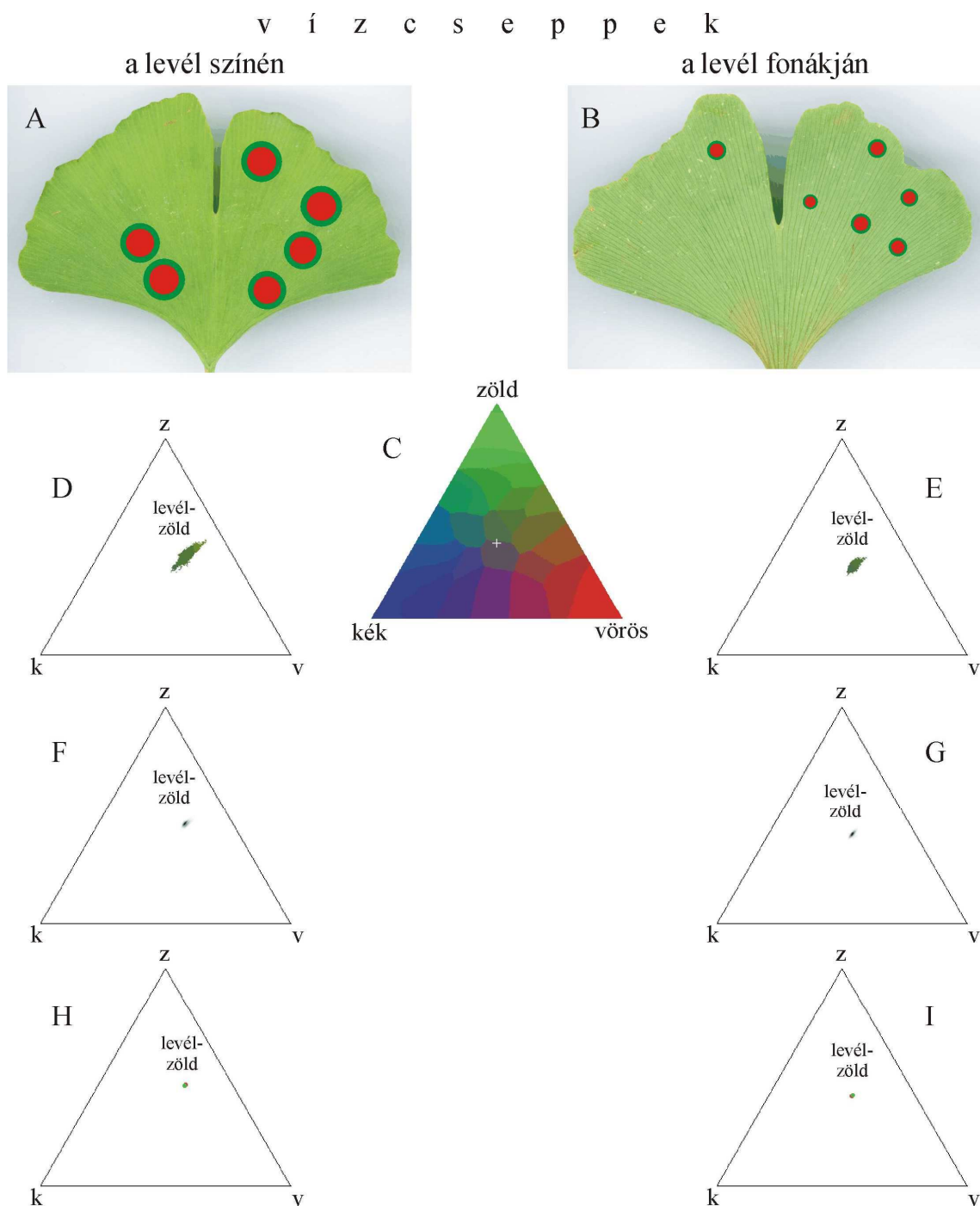
8. ábra. (A) A 7. ábra üveggömbjére számított maximális Q fénygyűjtőképesség 10-es alapú logaritmusai a beeső napfény horizonttól mért θ szögének ($\theta = 0^\circ$: horizont, $\theta = 90^\circ$: zenit) függvényében. A fekete kör az üveggömb függőleges főtengelymetszetét ábrázolja. A 7. ábra 1., 2., ... 7., 8. soraihoz tartozó adatokat fekete négyzetek jelölik. (B) Az üveggömb által fókuszált, s a levélszövet által elnyelt $I(\theta) = Q(n_{\text{üveg}}=1.5, \theta) \cdot a(\theta)$ napfényintenzitás 10-es alapú logaritmusának levélsíkbeli maximumértékei. $a(\theta)$ a levélszövet szoláris elnyelési tényezője. A 7. ábra 1., 2., ... 7., 8. soraihoz tartozó adatokat fekete négyzetek jelölik.

Mivel (i) eső, illetve öntözés után a leveleken megtapadt vízcseppek általában nem gömbölyűek (*2B ábra*), (ii) a víz törésmutatója ($n_{\text{víz}} = 1.33$) jóval kisebb, mint az üvegé ($n_{\text{üveg}} = 1.50$), és (iii) a levelekhez tapadt vízcseppek hűtik a levélszövetet, a vízcseppek napfényfókuszálása nagyban különbözik az 1. kísérletbeli üveggolyókéétól. Ezért végeztem el a 2. kísérletet, melyben vízszintes, sima, vízcseppekkel borított páfrányfenyő - és juharleveleket tettem ki napfénynek (*2. ábra*), hogy modellezzem azt az esetet, mikor eső vagy öntözés után közvetlen napfény éri a vizes leveleket.

A 2. kísérletben a vízcseppekkel borított vízszintes páfrányfenyő - és juharlevelek nem szenvedtek semmiféle szemmel látható napégést (barnulás). Ezt a *9. és 10. ábrák* szemléltetik két olyan páfrányfenyőlevél esetén, mikor a vízcseppek a levél fonákján, illetve színén voltak a 2. kísérlet 3. besugárzásakor (*4. táblázat*). A negatív eredményt (azaz hogy nem volt napégés a vízcseppek ellenére) a 2. kísérlet 3. besugárzása esetére mutatom be részletesen páfrányfenyőlevelekkel. Ekkor volt ugyanis a legnagyobb esély a napégésre, mert délben a legintenzívebb a napsugárzás, és a páfrányfenyőleveleken igen gömbölyűek a vízcseppek (*2B ábra*) a sima, erősen víztaszító viaszos levélfelszín miatt. A 2. kísérletből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy vízszintes páfrányfenyő- és juharleveleken ülő vízcseppek nem képesek kiégetni (bebarnítani) a levélszövetet. Figyelembe véve a széles körben elterjedt azon vélekedést, hogy a leveleken megtapadó vízcseppek napsütésben napégést okoznak, ezen eredmény váratlan volt.



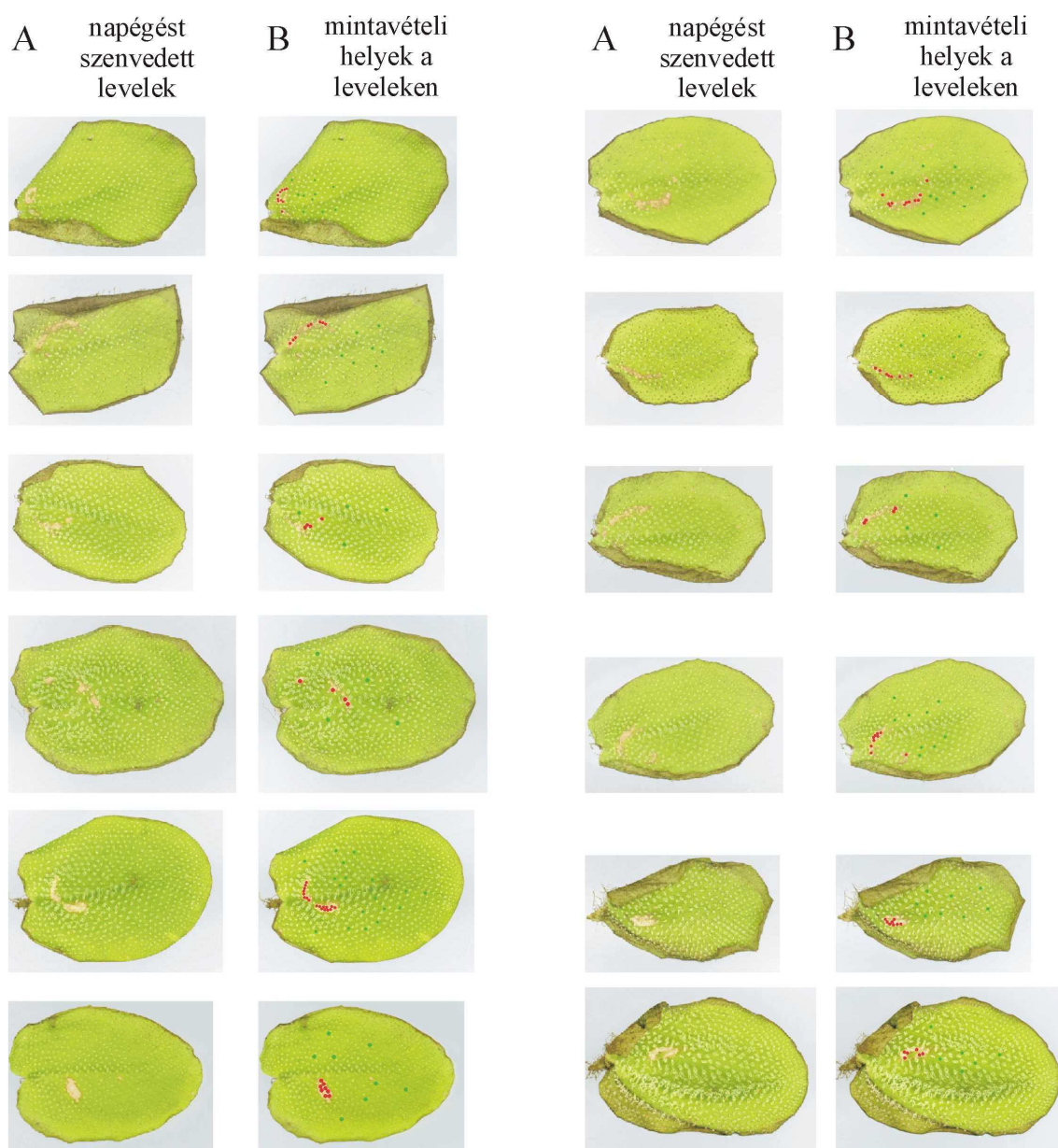
9. ábra. Azon páfrányfenyőlevelek (*Ginkgo biloba*) színének (A, B) és fonákjának (C, D) fényképei, melyek színén (A), illetve fonákján (D) ültek a vízcseppek a 2. kísérlet 3. besugárzása során (1. táblázat). A vízcseppeknek a 10. ábra szerinti mintavételezéshez szükséges helyei a levelek színén és fonákján úgy voltak kivehetőek, hogy a cseppek halvány lenyomatai (melyek alig kivehetően látszanak csak az A és D ábrákon) a leveleken maradtak a víz elpárolgásakor visszamaradt sókristályoknak (csapvízüledéknek) köszönhetően.



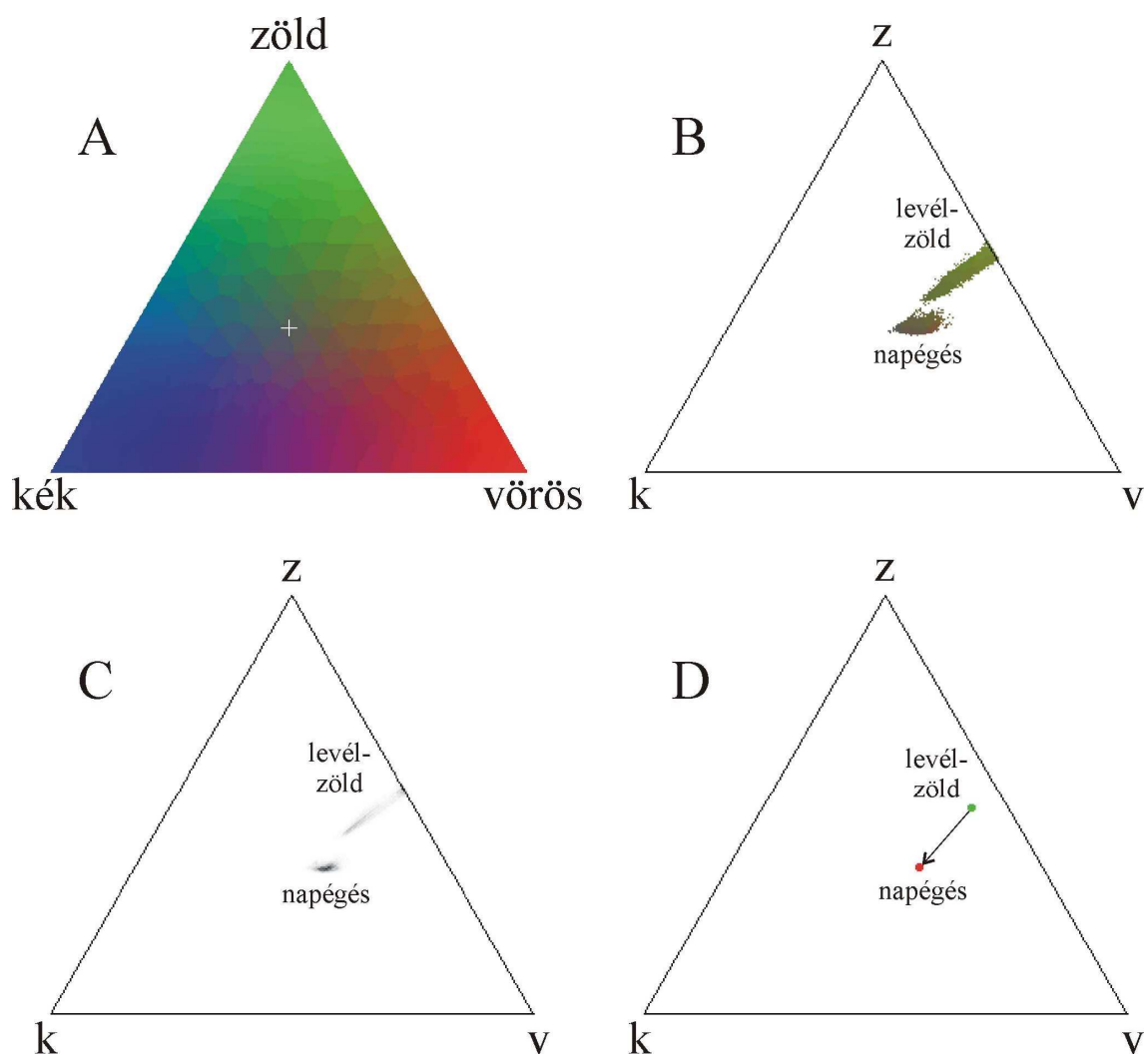
10. ábra. (A, B) Mintavételezés a 9. ábra A és D páfrányfenyőlevelén a vízcseppek helyein (piros körök) és azok környezetében (zöld gyűrűk). Mindkét mintának azonos a felülete (egyforma a zöld és piros képpontok száma). (C) Egyenlő oldalú színháromszög. (D, E) A mintavételezett levélrészek színeinek színháromszögbeli elhelyezkedése. (F, G) A mintavételezett levélrészek színeinek gyakorisága: minél sötétebb egy pont, annál gyakoribb az adott szín. (H, I) A két minta színeinek tömegközéppontja (piros és zöld pontok). A két tömegközéppont gyakorlatilag azonos helyen található.

A 2. kísérletben a vízszintes, sima levéllemezhez tapadt vízcseppek fókuszirtománya határozottan a levélszövet alá esett, így a cseppek által fókuszált napfény intenzitása a levélen nem volt elég nagy a napégéshez. Ha egy vízcsepp távolabb helyezkedhet el a levél felszínétől, akkor a fókuszirtománya a levéllemezre eshet, így már okozhat napégést a levélszövetben. E helyzet általában akkor állhat elő, mikor szőrös levelekre kerülnek vízcseppek, s a viaszos, víztaszító szőrök a vízcseppeket a levéllemez fölött tartják.

Hogy ilyen helyzetet is tanulmányozzak, elvégeztem a 3. kísérletet, amiben a rucaöröm (*Salvinia natans*) szélsőségesen nagy vízlepergető-képességű, szőrös, vízcseppek leveleit tettem ki közvetlen napfénynek (3. ábra). A rucaörömlevelek szőreit vékony, víztaszító viaszszálak kötegei alkotják, amelyek nagyobb vízcseppeket is képesek olyan magasságban tartani, hogy a cseppek nem érnek a levéllemezhez (3B-F ábrák). A 11A ábrán néhány rucaörömlevél látható a napfényvel való besugárzás után. E leveleken jól kivehetőek a barna napégéses foltok. A 12. ábra kvantitatívan szemlélteti a rucaörömlevelek ép és napégett részei közötti nagy színelkülönbséget. A 3. kísérlet alapján azt mondhatjuk, hogy eső vagy öntözés után napsütésben a levelek víztaszító viaszszőrei által tartott vízcseppek okozhatnak napégést a levélszövetre fókuszált fényintenzitás nagy értékei miatt.

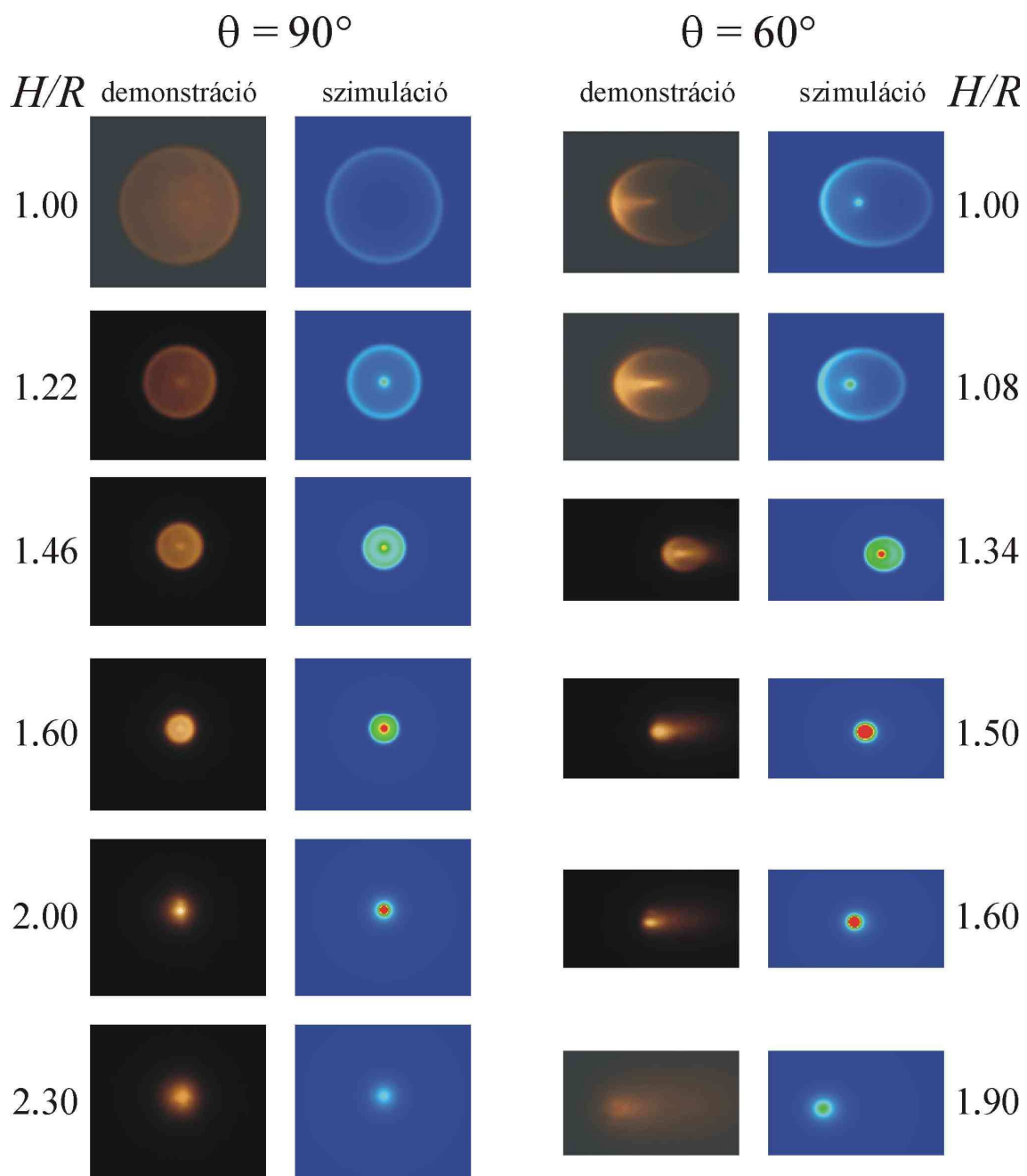


11. ábra. (A) Barna napégési foltok a rucaöröm (*Salvinia natans*) szőrös, zöld levelein, a 3. kísérletben. (B) A levelek szőrtelen részein való mintavételezések helyei az ép (zöld pontok) és a napégett (piros pontok) levélrészeken. A zöld és piros mintavételezési felületek azonos nagyságúak.

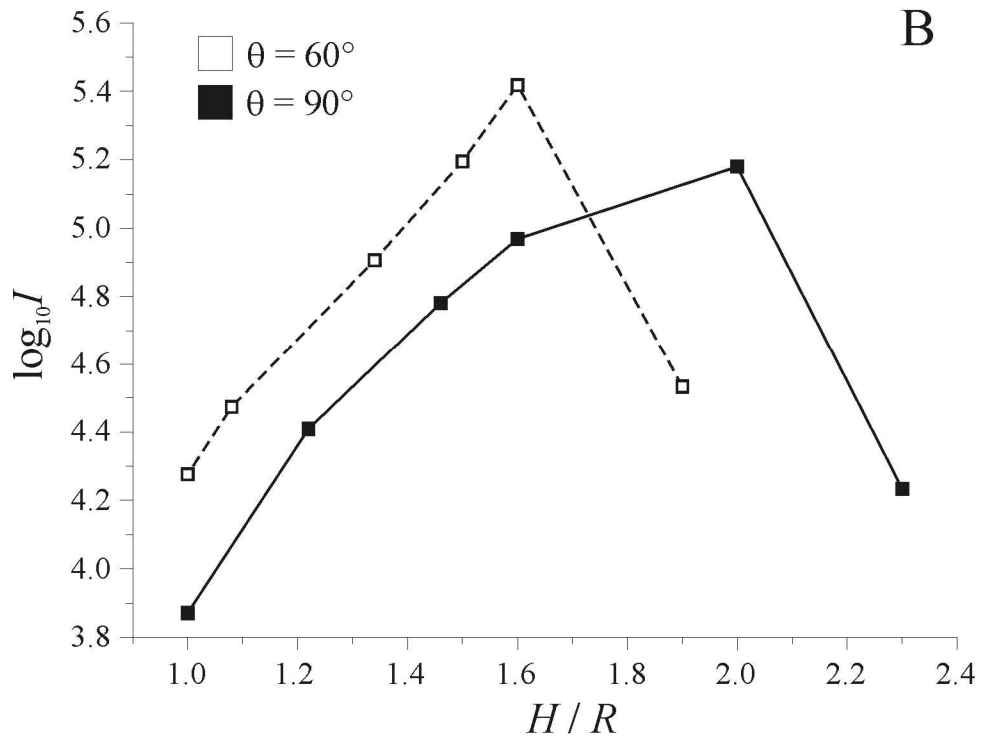
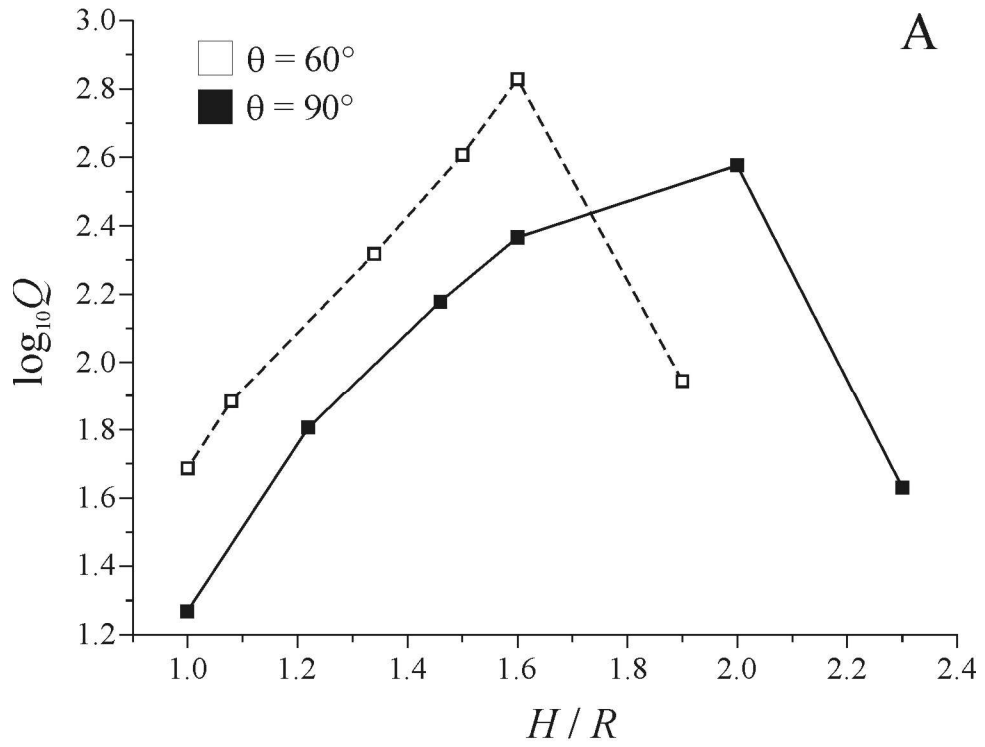


12. ábra. (A) Egyenlő oldalú színháromszög. (B) A 11. ábrán látható rucaörömleveleken mintavételezett ép (zöld) és napégett (barna) részek színeinek színháromszögbeli elhelyezkedése. (C) A rucaörömlevelek ép és napégett részei színeinek gyakorisága: minél sötétebb egy pont, annál gyakoribb az adott szín. (D) A rucaörömlevelek ép és napégett részei színeinek tömegközéppontja (piros és zöld pontok). A nyíl a napégés miatti színeltolódást mutatja.

A 13. ábra egy R sugarú vízgömb által, a gömb középpontjától H távolságra lévő és az optikai tengellyel θ szöget bezáró sík ernyőre fókuszált fény intenzitásmintázatát szemlélteti $\theta = 90^\circ$ és 60° irányszögek esetén. Ugyanitt láthatók az adott H/R arányhoz számítógépes modellezéssel számított intenzitásmintázatok is. Jól látszik, hogy a számított intenzitásmintázatok közel állnak a valós (fényképezett) mintázatokhoz. A 14. ábra a vízgömb Q fénygyűjtő-képessége és a levélszövet által elnyelt I intenzitás 10-es alapú logaritmusát mutatja a kísérlet (4., 13. ábra) H/R értékeinek függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° mellett. Q és I akkor maximális, ha az ernyő a vízgömb fókusztartományát metszi ($H/R = 1.6$ és 2.0 , mikor $\theta = 60^\circ$ és $\theta = 90^\circ$). Ekkor $\log_{10}Q$ és $\log_{10}I$ elérheti a 2.6-2.8 és 5.2-5.4 értékeket is a bejövő fénynyaláb irányától függően. Ilyen erős fókuszálás akkor fordulhat elő, ha a vízcseppek egy szőrös levélen ülnek. Ekkor a szőrök megfelelő távolságban tarthatják a gömbölyded vízcseppeket a levél felszíne fölött ahhoz, hogy súlyos égési sérüléseket okozzanak, ahogyan azt a 3. kísérletben megmutattam (3, 11, 12 ábrák).



13. ábra. Egy R sugarú vízgömb által, a gömb középpontjától H távolságra lévő és az optikai tengellyel θ szöget bezáró sík ernyőre fókuszált fény intenzitásintázatainak fényképei és elméleti úton számított eloszlásai $\theta = 90^\circ$ és 60° esetén H/R függvényében.



14. ábra. A 4. és 13. ábrabeli R sugarú vízgömbre számított $\log_{10} Q$ and $\log_{10} I$ értékek H/R függvényében $\theta = 60^\circ$ és 90° -ban beeső párhuzamos fénynyaláb esetén, ahol H az ernyő és a gömb középpontjának távolsága.

5. Elemzés

A növényi levelek nedvesítése jelentősen függ a levélfelület tulajdonságaitól. A felület jellemzői fontosak a levelek nedvesítő-, vízáteresztő- és vízmegtartóképességének, valamint a levegő és növény közti gázcserre meghatározásában és szabályzásában (FOGG (1947), HOLLOWAY (1969), MARTIN - JUNIPER (1970), JUNIPER - JEFFREE (1983)). A nedvesítéssel kapcsolatban megemlíthetem az úgynevezett lótuuszhatást (CHENG - RODAK (2005)): Amikor esőcsepp hullik a lótuusz (*Nelumbo nucifera*) levelére, a vízcsepp egészen gömbölyűvé válik a levéllemezen. Ekkor a nedvesítési szög akár 160° is lehet. A lótuuszlevélre hullott vízcseppek azonnal legurulnak, és ezáltal meg is tisztítják a levélfelszínt a szennyeződésektől. E jelenség a levelek fölépítésének két szintjéből, valamint a levelet borító viaszréteg jelenlétéből ered. Pásztázó elektronmikroszkóppal megvizsgálva egy lótuuszlevelet azt láthatjuk, hogy mikrométer nagyságrendű egyenetlenségek és azokon belül nanométer nagyságrendű szőrök borítják a levél egész felszínét. E kétszintű egyenetlenség teszi lehetővé, hogy levegő szoruljon a levél és a ráhulló vízcsepp közé. Ekkor a lótuuszlevélnek nagy a nedvesítési szöge, s ez felelős a víz lepergéséért is. A lótuuszlevél viselkedhet víztaszító, illetve nedvesítő felületként is attól függően, hogy a vízcsepp miként kerül a felszínére (CHENG - RODAK (2005)). A kísérleteinkben vizsgált páfrányfenyő- és rucaörömlevelek szintén erősen víztaszítóak voltak a felszínük lótuuszlevéléhez hasonló struktúrája miatt.

A növényi levelek felületi struktúrája nagyban befolyásolja a levélhez tapadt vízcseppek által a levéllemezeire fókuszált napfény fiziológiai következményeit. Ha eső után a leveleket vékony vízréteg borítja, akkor a levelek mindaddig nem képesek lélegezni, amíg el nem párolog róluk a víz, mivel a gázcserenyílásokat a víz elzárja. Hogy ezt elkerüljék, bizonyos növények hatékony módszereket fejlesztettek ki a víz lepergetésére (DE GENNES et al. (2004)):

- A) Mikroszkopikus skálán vízlepergető struktúrák (például víztaszító viaszszőrök, bordák) alakultak ki a levél felszínén, hogy megnehezítsék a víz megtapadását.
- B) Makroszkopikus skálán a levél felszínén különböző struktúrák vezetik el a vizet (vízelvezető csatornák, levélcúcs).

Általános szabály, hogy minél nagyobb a levélfelszín nedvesítési szöge (azaz minél víztaszítóbb), annál kevesebb vizet képes megtartani a levél. A vízcseppek könnyen legurulnak például a lótosz, páfrányfenyő és rucaöröm nagyon víztaszító leveleiről, ha azok kissé dőltek a vízszinteshez képest.

Az 1. kísérletben (1. ábra) megmutattam, hogy napsütésben vízszintes, sima leveleken nyugvó üveggolyók megégetik a leveleket (4., 6. ábra), mert egy optikailag homogén üveggolyó fókuszirtománya a napfény beesési szögének széles tartományában közel kerülhet, illetve pontosan ráeshet az alatta levő levéllemezre. Amíg a napfény beesési szöge ebben a tartományban van, az üveggolyó által a levélfelszínre fókuszált napfény intenzitása igen nagy, ami napégést (barnulás) okoz. Mialatt a Nap az égen halad, a golyó fókuszirtománya egy barna (beégett), ívelt vonalat hagy maga után a levélszövetben (5. ábra).

Természetesen az üveggolyós 1. kísérlet eredményei alapján nem állítható, hogy a leveleken megtapadó vízcseppek is képesek kiégetni a levélszövetet napsütésben. A vízcseppek jóval kisebb törésmutatóval ($n_{\text{víz}} = 1.33$) rendelkeznek, mint az üveggolyók ($n_{\text{üveg}} = 1.50$), így kisebb a fénytörőerejük is. [Egy optikailag homogén közeg, például üveg vagy víz, fénytörőerején az $(n - 1)/R$ mennyiséget értjük, ahol n a közeg törésmutatója és R a felület helyi görbületi sugara.] Továbbá, a leveleken ülő vízcseppek alakja általában elipszoidhoz hasonló, azaz egy gömbnél laposabb. Ez méginkább hozzájárul a fénytörőerő csökkenéséhez az üveggolyóhoz képest. Mindebből azt szűrhetjük le, hogy sima, vízszintes leveleken lévő vízcseppek fókuszirtománya messze a levél síkja alá esik úgy magas, mint közepes vagy alacsony napállásokra. A vízcseppek fókuszirtománya az őket tartó levél síkjára csak nagyon alacsony napállás esetén eshet. Ekkor viszont a lemenő Nap fényének intenzitása már túl kicsi ahhoz, hogy napégést okozzon a levélszövetben. Ez a fő oka a 2. kísérlet (2. ábra) eredményének, miszerint vízszintes leveleken nyugvó napsütötte vízcseppek nem okoznak égési sérüléseket a levélszövetben (9., 10. ábra), függetlenül a napmagasságtól és a cseppalaktól. Megjegyzem, hogy a 2. kísérletben (4. táblázat) a θ napmagasság kicsi (1. besugárzás), közepes (2. besugárzás) és nagy (3. besugárzás) volt, továbbá a levélhez tapadt vízcseppek szinte gömbölyűek voltak a páfrányfenyőleveleken, és lapos lencseszerűek a juharleveleken (2B ábra).

Van még két további, fiziológiailag fontos különbség a levélen nyugvó üveggolyók és vízcseppek között:

- A vízcseppek, főleg a laposak, a levél felszínét nagyobb felületen érintik, mint az üveggolyók.
- A víz párolgása hűti a vízcsepp alatti levélfelületet, az üveggolyó viszont nem. Ennek következménye, hogy a vízcseppek sokkal hatékonyabban hűtik az alattuk elhelyezkedő levélszövetet, mint az üveggolyók, s így jobban csökkentik a fókuszált napfény általi beégés veszélyét.

A 3. kísérletet víztaszító viaszszőrökkel borított rucaörömleveleken ülő gömbölyű vízcseppekkel végeztem. E levelek nagyon hasonlóak a lótuszéihoz, amelyekről a nagyobb vízcseppek könnyen legurulnak a nagy nedvesítési szögnek köszönhetően. (1) A vízcseppek gömbölyded alakjának, (2) a cseppek levéltől való távolságának, és (3) a víz általi hűtés hiányának köszönhetően a rucaörömlevelek megégték a tűző napon (11., 12. ábra). A rucaörömleveleken ülő vízcseppek gömbölyű volta nagy fénytörőerőt eredményezett. Továbbá az a tény, hogy a cseppek nem is értek hozzá a levélhez a viaszszőrök miatt, lehetővé tette, hogy a cseppek fókuszirtományai a levéllemezre estek. A levélfelületre fókuszált napfény nagy intenzitása és a víz általi hűtés hiánya a levélszövet beégését eredményezte.

Minél inkább víztaszító egy levél felszíne, annál nagyobb a nedvesítési szög a víz és a levél kutikulája között, annál kisebb a levél vízmegtartó képessége, és annál gömbölyűbb a levélen ülő vízcsepp alakja. A nagyobb görbületük miatt a gömbölyű vízcseppek jobban megtörik a fényt, mint a lapos ellipszoid alakúak, ezért nagyobb a fénygyűjtőképességük, tehát nagyobb eséllyel okoznak égési sérülést a levélszövetben. Ennélfogva csak az erősen víztaszító levélfelületeken tudnak kialakulni annyira gömbölyű vízcseppek, amelyek napsütésben képesek égési sérüléseket okozni, viszont éppen az ilyen levelekről pereg le könnyen a víz már kis légmozgás vagy a vízszinteshez képesti dőlésszög esetén is. Mindebből az a következtetés vonható le, hogy eső vagy öntözés után napsütésben az erősen víztaszító levelek nem szenvednek napégést, mert a víz jelentős része leperog róluk.

Másrésről pedig a nedvesítő felületű leveleken, mint például a juharleveleken, a víz lapos cseppek formájában képes megtapadni a kis nedvesítési szögnek köszönhetően. Az ilyen vízcseppek lapultsága miatt a fényfókuszáló-képességük igen gyenge, ezért nem okoznak napégést. Következésképpen, az eső vagy öntözés utáni napsütésben a nedvesítő levelek nem szenvednek napégést.

A fentiek alapján arra a végkövetkeztetésre jutunk, hogy a napsütötte vízcseppek gyakorlatilag soha sem okoznak napégést sem víztaszító, sem pedig szőrtelen, sima nedvesítő leveleken. Mindezt jól alátámasztják a 2. kísérlet eredményei is.

Ugyanakkor a 3. kísérletben megmutattam, hogy ha a levelet víztaszító viaszszőrök borítják, melyek képesek a levélfelszín fölött tartani a vízcseppeket, akkor tűző napon előfordulhat napégés a levélszövetben (11., 12. ábra). Ezért az eső vagy öntözés utáni napsütésben a vízlepergető növényi levelek (például a rucaöröm levelei) súlyos égési sérüléseket szenvedhetnek, ha a víz képes cseppek formájában megmaradni rajtuk. A szupervíztaszító szőrös levelek (például a lótusz és a rucaöröm leveleinek) nagy előnye, hogy könnyen lepergetik magukról a vizet, aminek következtében a szennyeződésektől is megszabadul a növény, így a légzőnyílások is szabaddá válnak. Azonban a szupervíztaszító felszínnek az az ára, hogy a víz igen gömbölyű cseppekké formálódik rajtuk, a szőrök a levéllemez fölött tarthatják a vízcseppeket, és ha azok mégiscsak a levélen maradnak, napégést okozhatnak.

Hangsúlyozom, hogy a levélszövet napégésszerű barna foltjait a következő környezeti tényezők is okozhatják:

- Savasesők miatt is keletkezhetnek elhalt szövetű, barna foltok a leveleken (HAINES et al. (1980, 1985)).
- Tengerpartokon a növények levelei a megtörő hullámokból szétfröccsenő sós víztől is károsodhatnak. A levelekre került tengervízcseppekben a víz párolgása miatt a sókoncentráció egyre növekszik, így az ozmózis miatt a levélszövetből a cseppbe áramlik a víz, s ezen ozmotikus vízvesztés a levél barnulásához, elhalásához vezet (APPLETON et al. (2002)).

- Esetleg a csapvízbeli só is eredményezhet levélbarnulást. A víz párolgása közben a vizeinkben gyakori ásványi sók olyan koncentrációsintet érhetnek el, ami már ozmotikus vízvesztés miatti levélbarnulást okozhat.
- Túl klóros csapvíz öntözéshez való használata is eredményezhet ozmotikus levélégést.
- Ha a növényekre túl sok tápanyagot, trágyát, vegyszert tartalmazó vizet permeteznek, akkor a leveleken megtapadó tömény oldatcseppek szintén eredményezhetnek barna foltokat a leveleken a levélszövet ozmotikus vízvesztése következtében (BOIZE et al. 1976).

E levélégéseknek természetesen semmi közük sincs a vízcseppek által fókuszált napfény nagy intenzitása miatti napégéshez.

Végül megemlítem, hogy napsütéses, meleg időben hideg víz permetezése, locsolása a növények leveleire fiziológiai stresszt okozhat, aminek ugyancsak valamilyen sérülés (például a levelek hervadása) lehet a következménye. Bár e sérülések nagyban különböznek a szőrökön ülő vízcseppek által okozott napégéstől, erősíthetik azt az elterjedt tévhitet, hogy tűző napon veszélyes a növényeket öntözni, mert a rajtuk megtapadt vízcseppek a napfényt fókuszálva kiégetik a leveleket. Remélem, hogy a diplomamunkámban bemutatott számítógépes és kísérleti eredmények segítenek tisztázni ezt a tévhitet.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőimnek, Dr. **Horváth Gábornak** és Dr. **Kriska Györgynek** a TDK dolgozat megszületésében nyújtott folyamatos támogatásukat, a kísérletekben való aktív közreműködésüket, és az ötletek kidolgozásában való együttgondolkodásukat.

Köszönöm Dr. **Gnädig Péternek** (ELTE Atomfizika Tanszék), amiért fölhívta figyelmünket arra, hogy a dolgozatom témáját képező problémakör előfordult az Oktatási Minisztérium által kiadott 2006. május 15-ki gimnáziumi fizika érettségi feladatsorának egyik feladataként, sajnos rossz megoldással.

Köszönöm Dr. **Orlóci Lászlónak**, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Botanikus Kertje igazgatójának, amiért lehetővé tette a rucaöröm (*Salvinia natans*) vízcseppes leveleivel folytatott besugárzási kísérlet (3. ábra) elvégzését a budapesti fűvészkertben.

Köszönöm **Bozsik Józsefnek** (Magyar Rádió, Budapest) a dolgozatom témájával kapcsolatos szakirodalom föl kutatásában nyújtott segítségét.

9. Irodalom

- AIRY, G. B. 1838: On the intensity of light in the neighbourhood of a caustic. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 6: 379-403
- APPLETON, B. - GREENE, V. - SMITH, A. - FRENCH, S. - KANE, B. - FOX, L., DOWNING, A. and GILLAND, T. 2002: Trees and shrubs that tolerate saline soils and salt spray drift. *Trees for Problem Landscape Sites* - Virginia State University, Publication 430-031
- BARDUCCI, A. - CASTAGNOLI, F. - GUZZI, D. - MARCOIONNI, P. - PIPPI, I. and POGGESI, M. 2004: Solar spectral irradiator for validation of remotely sensed hyperspectral data. *Applied Optics* 43: 183-195
- BERK, A. - BERNSTEIN, L. S. and ROBERTSON, D. C. 1983: MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysical Laboratory Technical Report GL-TR-83-0187, Hanscom Air Force Base, MA 01731-5000
- BOIZE, L. - GUDIN, C. and PURDUE, G. 1976: The influence of leaf surface roughness on the spreading of oil spray drops. *Annals of Applied Biology* 84: 205-211
- CEBULA, R. P. - THUILLIER, G. O. - VANHOOSIER, M. E. - HILSENATH, E. - HERSE, M. - BRUECKNER, G. E. and SIMON, P. C. 1996: Observations of the solar irradiance in the 200-350 nm interval during the ATLAS-1 mission: a comparison among three sets of measurements – SSBUV, SOLSPEC, and SUSIM. *Geophysical Research Letters* 23: 2289-2292
- CHANCE, K. V. and SPURR, R. J. D. 1997: Ring effect studies: Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum. *Applied Optics* 36: 5224-5230
- CHENG, Y-T. and RODAK, D. E. 2005: Is the lotus leaf superhydrophobic? *Applied Physics Letters* 86: 144101
- COESA 1976: *U. S. Standard Atmosphere*, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- CSERTI, J. 2005: A szivárvány fizikája: esőcseppek fényszórási jelenségei. I., II., III. rész *Fizikai Szemle* 55: 297-302, 349-355, 422-427

- DE GENNES, P.-G. - BROCHARD-WYART, F. - QUÉRÉ, D. 2004: *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Springer- Verlag, Heidelberg - Berlin - New York
- DESCARTES, R. 1637: *Oeuvres de Des Cartes. La Géométrie*. Livre 2, J. Maire, Leyden
- FOGG, G. E. 1947: Quantitative studies on the wetting of leaves by water. *Proceedings of the Royal Society of London B* 134: 503-522
- HAINES, B., STEFANI, M. and HENDRIX, F. 1980: Acid rain: threshold of leaf damage in eight plant species from a southern Appalachian forest succession. *Water, Air, and Soil Pollution* 14: 403-407
- HAINES, B. L. - JERNSTEDT, J. A. and NEUFELD, H. S. 1985: Direct foliar effects of simulated acid rain II. Leaf surface characteristics. *The New Phytologist* 99: 407-416
- HALTHORE, R. N. - SCHWARTZ, E. S. - MICHALSKY, J. J. - ANDERSON, G. P. - FERRARE, R. A. - HOLBEN, B. N. and BRINK, H. M. T. 1997: Comparison of model estimated and measured direct-normal solar irradiance. *Journal of Geophysical Research D* 102: 29991-30002
- HOLLOWAY, P. J. 1969: The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology* 63: 145-153
- JAGGER, W. S. 1992: The optics of the spherical fish lens. *Vision Research* 32: 1271-1284
- JUNIPER, B. E. and JEFFREE, C. E. 1983: *Plant Surfaces*. Arnold, London
- KHARE, V. and NUSSENZWEIG, H. M. 1974: Theory of the rainbow. *Physical Review Letters* 33: 976-980
- KÖNNEN, G. P. and DE BOER, J. H. 1979: Polarized rainbow. *Applied Optics* 18: 1961-1965
- KRÖGER, R. H. H. - CAMPBELL, M. C. W. - FERNALD, R. D. and WAGNER, H.-J. 1999: Multifocal lenses compensate for chromatic defocus in vertebrate eyes. *Journal of Comparative Physiology A* 184: 361-369

- KURUCZ, R. L. 1995: The solar irradiance by computation. In: *Proceedings of the 17th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models*, edited by G. P. Anderson, R. H. Picard, and J. H. Chetwynd, 332 pp., Phillips Lab., Geophys. Dir., Bedford, Mass.
- LAND, M. F. and NILSSON, D.-E. 2002: *Animal Eyes*. Oxford University Press, Oxford, UK, p. 221
- LEE, R. L., Jr. 1998: Mie theory, Airy theory, and the natural rainbow. *Applied Optics* 37: 1506-1519
- NUSSENZWEIG, H. M. 1977: The theory of the rainbow. *Scientific American* 236: 116-127
- MARTIN, J. T. and JUNIPER, B. E. 1970: *The Cuticles of Plants*. St. Martin's Press, New York
- MOSS, R. A. and LOOMIS, W. E. 1951: Absorption spectra of leaves. I. The visible spectrum. *Journal Paper number J-2017 of the Iowa Agricultural Experiment Station, Project 1139*, pp. 370-391
- RADÓ, D. 2001: *A növényzet szerepe a környezetvédelemben*. Zöld Érdek Alapítvány – Levegő Munkacsoport, Budapest
- WANG, R. T. and van de HULST, H. C. 1991: Rainbows: Mie computations and the Airy approximation. *Applied Optics* 30: 106-117